# 衛星データと現地調査を併用した九州圏域における斜面災害危険箇所の検証

山本健太郎<sup>1</sup>, 永川勝久<sup>2</sup>, 吉川猛<sup>3</sup>, 立石義孝<sup>4</sup> <sup>1</sup>大分大学, <sup>2, 3</sup>基礎地盤コンサルタンツ(㈱, <sup>4</sup>インフラ&ジオ総合研究所

本研究では、2020 年 7 月での集中豪雨が原因で発生した福岡県田川郡川崎町民運動公園道路災害(地すべり)を 現地調査した.次に、衛星データである(ALOS-2 データ)を利用した 2 時期の差分干渉 SAR 解析を実施し、その 地盤変動解析の結果について報告する.

### 1. はじめに

近年、リモートセンシング技術の一つとして の干渉 SAR 解析モニタリングが知られており, 差分干渉 SAR 解析による地表変位監視も世界 的に積極的に研究されてきている.干渉 SAR 解 析は、地球を周回する軌道からの合成開ロレー ダー(SAR)を用いて、地表から伝送されるマイ クロ波の反射波のデータを観察する.そして、 地上観測衛星大地2号(ALOS-2/PALSAR-2)上 の合成開ロレーダーは、これまでにない解像度 で地表の変化をとらえることができる.したが って、過去に観測されにくい波動領域分布を得 ることができる大きな利点があり、センチメー トルスケールの広域表面運動を検出することが でき、差分干渉 SAR 解析の精度はミリーセンチ メートルである.

これまで、多くの研究が干渉 SAR 解析をすべ り面運動の検出に適用してきた. これらの従来 の研究は、過去に観測されにくい地表運動の空 間分布と, すべりブロックの活動性を評価する タイムリーな進化を捉えることができた利点を 持ち、すべり変位監視の有効性を検証するのに 役立つことを示した. 例えば, 石塚ら りは, 白 山甚之助谷と湯ノ谷周辺の干渉 SAR 分析では、 2014年10月から2015年7月にかけて、 甚之助 谷と湯ノ谷周辺のブロックで約10 cm の地すべ りが発生したことを明らかにした.次に、神山 ら<sup>2)</sup>は、和歌山県田辺市を流れる右会津川の右 岸から紀伊山地南縁部の標高 300-400 メートル 程度, 勾配 20°-30°東側の斜面に対して斜面変動 を捉え、地すべり変動が見られる斜面において、 SAR 分析の斜面変動による実効性を確認した.

現状では、干渉 SAR 解析に必要となる衛星デ ータについては、データ収集を続けてきている. また、ALOS-2 は空間高分解能データを取得す ると共に、レーダー照射パワーと定軌道精度を 向上させている.従って、ALOS-2 データを用 いることで、地表面運動をより明確に捉えるこ とができる. そこで,本研究では,ALOS-2 が 新たに取得したデータを用いて,2020年7月で の集中豪雨が原因で発生した福岡県田川郡川崎 町民運動公園道路災害(地すべり)の調査と解 析を実施し,変動する空間分布の中から当該地 域で発生した地表面の変位を調べた.そして, 解析的に検出された変位領域を現地調査結果と 比較し,得られた結果から DInSAR 解析による すべり変位監視の有効性を検証した.

### 2. 干涉 SAR 解析

SAR は合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar)の略であり,日本では陸域観測技術衛星 だいち2号(ALOS-2/PALSAR-2)に搭載されている.だいち2号は2014年から運用が開始され, 昼夜を問わず観測を行い,高分解能のデータが 蓄積されつつある.

干渉 SAR は同じ場所を観測した異なる2時期 の観測記録に干渉処理を施すことにより地盤変 位を抽出する解析技術である.図-1 は干渉 SAR の概念図<sup>3)</sup>を示す.主に、大地震、火山噴火に よる地殻変動抽出や地すべり観測、広域地盤沈 下観測の分野での利用事例が多い.



図-1 干渉 SAR の概念図

衛星には進行方向と観測方向に特定の法則が ある.衛星の進行方向は北行軌道と南行軌道が あり(図-2),基本的に衛星進行方向の右側を観測 する仕組みとなっている.従って,観測対象物 の位置によっては,例えば,「物陰になる」など 解析の障害となる場合があるため,データの選 択時には注意が必要となる.

衛星が地表を観測する角度(オフナディア角) は、ALOS-2/PALSAR-2 の高分解能モードの場 合,おおよそ 30°-40°である(図-3 参照). 干渉 SAR により得られる地盤変位は、衛星視線方向の変 位量(衛星に近づく,衛星から遠ざかる)である.



図-2 衛星の進行方向



図-3 衛星の撮影角度

# 3. 差分干涉 SAR 解析

差分干渉 SAR 解析<sup>4)</sup>(Differential Interferometry SAR: DInSAR)は、干渉 SAR 解析の中でも特に 地盤変位量を得るものである.同地点かつ異な る2時期のSAR データを干渉させることによっ て、その期間における衛星と地表面の間の距離 変化、すなわち地表面変位を推定することがで きる.

DInSAR 解析の精度はミリ-センチメートルで ある.解析によって地すべりや地盤沈下などの 局所的な地表面変位を捉えることができる. DInSAR 解析手順の概要を,図-4 に示す<sup>5)</sup>. DInSAR 解析は、ほぼ同一の軌道上から観測さ れた2時期のSAR画像データを用いて、2時期 の SAR データの位相差である. 基準となる時期 の画像をマスター画像、もう一方の画像をスレ ーブ画像と呼ぶ. このとき, 各々の SAR 画像を 取得した衛星の位置の空間的な直線距離(基線 長)が短いほど、干渉性は高くなる. 解析を行う ときは、捉えたい地盤変動の時期を考慮し、干 渉性の高さを伴った適当な SAR データのペア を選択する必要がある.マスター画像とスレー ブ画像の間の位相差を構成する代表的な成分は, 軌道縞,地形縞,変動縞である.地表面変位を 示す位相差は、変動縞である.変動縞を検出す るために、軌道縞と地形縞を全体の位相差から 取り除く.処理過程はまず,2時期のSAR 画像 の位置合わせを行った後,初期干渉画像を作成 する. 初期干渉画像は、すべての位相差を含ん でいる. 軌道縞は、平坦地表における衛星と地 表面間の距離(スラントレンジ長)の変化によっ て、入射角が変化するために生じる、軌道縞は、 SAR データのもつ衛星の軌道情報を用いて計算, 推定することができる. 推定した軌道縞は、初 期干渉画像から取り除かれる.次に、地形編は、 地表面の標高変化に伴い入射角が変化すること で生じた干渉縞である. 地形縞の推定には, 既 存の地形標高モデル(Digital Elevation Model: DEM)を用いる. 推定した地形縞は, 軌道縞を取 り除いた干渉画像から除去され、最終的な変動 縞が求められる.変動縞は軌道縞、地形縞以外 の位相誤差を含んでいることがある. 最終的に 検出された変動は、衛星視線方向における地表 面の変位量を示している. すなわち, 鉛直方向 と水平方向の変位の組み合わせとなる.

#### 4. 調査対象の地すべり概要

被災箇所は,田川郡川崎町大字川崎地先の川 崎町民運動公園で,令和2年7月(7月6-7日) の集中豪雨が原因で,運動公園の周回道路で地 すべりが発生したと考えられる.

被災箇所は、川崎町役場より南南東約 1.3km に位置し、高見団地より南方約 0.3km の小高い 丘陵地に位置する.被災箇所の地質は、新生代・ 古第三紀の直方層群と称される堆積岩を基盤と し、その上には第四紀の造成時に発生した盛土 層が覆っている.直方層群は、全体的に風化さ れた強風化帯〜弱風化帯に分類される.強風化 帯は、全体的に風化が著しく土砂化され、固結 した粘性土〜砂質土を呈し、概ね硬質である. 弱風化帯は、新鮮・硬質な短〜柱状コアを示し、



図-4 DInSAR の解析手順<sup>5)</sup>

軟岩状を呈する.盛土層は,基盤岩の風化した 粘性土を主体とし,一部,含水比が高く極めて 軟弱な深度が認められる.また,高台にも関わ らず,地下水位は盛土層に位置し,浅部に分布 する.崩壊土は,上位の盛土が崩落し堆積した もので,粘性土を主体とし,緩く軟質を呈する.

図-5 には雨量の変動(7月6-7日)を示す. 観測地は添田観測所である. 梅雨末期に発生し, 3 時間連続雨量117.5mm となっている. 西日本 豪雨までは至っていないが,それに準ずる豪雨 と言える.また,前日の7月6日の日雨量は 157.0mm であり,相当な雨量であった.

現地調査は道路陥没等もより顕著となった令 和2年11月末から実施した.図-6は被災箇所位 置図,写真-1には写真位置図を示す.写真-2, 写真-3にはそれぞれ,北側からと南側からの全 景写真を示す.崩壊規模は,幅約35m,奥行き 約25m,高さ約10mである.道路の谷側斜面 が滑落し,現在は片面通行となっている.写真 -2から道路中央部で約1mの滑落が見られた. 全景写真からは,車道,歩道,水路が崩壊し,

各構造物は開口し,谷側へずれていることも観察できた.次に,写真-4には斜面内の状況を示す.上部のブロック積が開口し,ずれが発生していること,基礎部で盤ぶくれや斜面中に滑落

や亀裂が見られた.斜面下部の擁壁が繋がって いない状況や水路の変形も見られた.写真-5 に は斜面下部の状況を示す.これを見ると,大き な亀裂や水路が大きく変形している状況もわか った.

なお,現地調査結果をまとめると,以下のようにまとめられる.

・ 道路が建設される以前は谷部であり、雨水 が流れ込みやすい地形を呈し、谷部を埋めた盛 土が滑った.誘因は梅雨期の集中豪雨により、 目視からも地すべりが発生したことがわかる.

・ 盛土は固結度の低い粘性土であり、造成時 に十分な転圧がなされなかったかその後の雨水 で地盤が緩くなったと考えられる. 道路の斜面 と逆側にはグラウンドがあり、そこからの雨水 の供給も考えられる.

・ 道路のセンターライン付近で亀裂が発生している.よって、この辺りが切土と盛土の境界と考えられる.

・ 斜面下部やその下の林の中には、いくつか の滑落や亀裂も見られ、地山が動いていたこと も確認できた.



図-5 雨量の変動



写真-1 写真位置図

図-6 被災箇所位置図



写真-2 全景 (P1 北側から望む)



写真-3 全景 (P2 南側から望む)



写真-4 斜面内の状況(P3から望む)

#### 5. 解析結果および考察

表-1 に示す ALOS2/PALSAR-2 のデータペア で差分干渉 SAR 解析を行った. 解析条件を以下 に示す. また, 図-7 に赤枠で衛星データの観測 範囲を示す. 衛星進行方向は南向き, 観測方向 は衛星の進行方向に対して右側である. また, 今回解析を行った範囲を青枠で示す. なお, ALOS2/PALSAR-2 データは JAXA の提供による.



写真-5 斜面下部の状況(P4から望む)

表-1 解析を行った干渉ペア				
	シーン ID	撮像日	軌 道	基線長 (m)
マス ター	ALOS23263229 40-200608	2020年 6月8日	뀨	125 292
スレ ーブ	ALOS23366729 40-200817	2020年 8月17日	闬	155.582



図-7 衛星観測範囲(赤枠)および解析範囲(青枠)

(ディセンディング)

#### 【解析条件】

- ・解析グリッド・・・・ 5m×5m
- ・使用 DEM・・・・・ 国土地理院数値標高
- モデル 5m メッシュ
- ・アンラップ方法・・・・Minimum Cost Flow 法
- ・コヒーレンス閾値・・・0.3
- ・ジオコードサイズ・・・5m×5m

ここでは、5m グリッドの解析結果のみを示す (図-8 参照).(a)~(d)には地すべり発生箇所周 辺の航空写真、フィルター処理後の干渉画像、 衛星視線方向変動分布図、鉛直方向に投影した 変動分布図の4種類の図を示す.また、解析結 果に4章を基に作成した地すべりラインを重ね て表示した.図-8に示す変動分布図より、5mグ リッド解析結果では地すべり発生地点において 変位が認められた.なお、ここで示す変動分布 図では、変位量0mm中心として4mmずつ着色 している.

衛星視線方向の変動分布図に着目すると,法 面上部に位置する道路のうち,亀裂の確認され ている範囲の中央付近では道路のセンターライ ンに沿って変位量に差が生じていることがわか る.センターラインの西側では最大で15mm 程 度衛星から遠ざかる動きがみとめられるのに対



(a) 航空写真



 $-\pi$ (rad)

(b) フィルタリング済みの差分干渉画像



(c) 衛星視線方向の変動分布図

(d) 鉛直方向の変動分布図

図-8 対象地区概況図(5m グリッド)

し、センターラインの東側では 5~8mm 程度の 動きにとどまる.また、地すべりブロック内部 はおよそ 7~8mm 程度の変位量を持つのに対し、 ブロック内部に位置する小規模な地すべりブロ ックでは変位量が-1mm 程度であり、5mm 程度 の相対差が生じていることとなった.

# 6. おわりに

今回, 5m グリッド解析結果においては輪郭な どは見られるが,それなりにわかりやすい結果 にはならなかった.これは,4章の写真は令和2 年11月末に撮影したが,干渉ペアのデータであ る8月時点では写真ほどの陥没はまだ発生して いなかったと考えられる.しかしながら,地す べり変位モニタリングのための SAR 解析の有 効性を確認することができた.

今後,精度を高めるためには,より多くの条件下での,実際の結果と比較して精度を高める 最適条件を決めることも今後の課題である.さらに,ノイズの問題やデータが高価なことにも 問題が残ると言える.

# 7. 謝辞

本研究内容の活動は、九州建設技術管理協会 「建設技術研究開発助成」により多大なサポー トを受けた.ここに謝意を表する.

# 参考文献

石塚師也,藤井幸泰: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一白山甚之助谷周辺の地すべりを例に一,2017年57巻6号 p.289-294.

2) 神山嬢子,國友優:干渉 SAR 解析による斜 面変動範囲推定手法の検討,2016 年 55 巻 3 号 p.187-190.

3) 日本リモートセンシング学会編:基礎から わかるリモートセンシング,理工図書株式会社, 2011.

4) 宮下智一,中山裕則:時系列複数 SAR デー タの干渉解析による地盤沈下モニタリング―青 森県・津軽平野の解析を例として一,日本大学 文理学部自然科学研究所研究紀要,No.52, pp.213-224, 2017.

5) 国土地理院ウェブサイト.

(https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar\_procedure.ht ml)