

差分干渉 SAR 解析を用いた地すべり危険箇所の検証

VERIFICATION OF DANGEROUS AREA DUE TO LANDSLIDE USING DIFFERENTIAL INTERFEROMETRIC SAR

山本 健太郎¹・永川 勝久²・吉川 猛³・鶴成 悦久⁴

Kentaro YAMAMOTO, Katsuhisa NAGAKAWA, Takeshi YOSHIKAWA, Yoshihisa TSURUNARI

¹ 大分大学減災・復興デザイン教育研究センター (〒870-1192 大分市大字旦野原 700 番地)

E-mail: yama-ken@oita-u.ac.jp

² 基礎地盤コンサルタンツ (株) 事業企画本部 (〒136-8577 東京都江東区亀戸 1-5-7
錦糸町プライムタワー12 階)

E-mail: nagakawa.katsuhisa@kiso.co.jp

³ 基礎地盤コンサルタンツ (株) 本社技術本部 (〒136-8577 東京都江東区亀戸 1-5-7
錦糸町プライムタワー12 階)

E-mail: yoshikawa.takeshi@kiso.co.jp

⁴ 大分大学減災・復興デザイン教育研究センター (〒870-1192 大分市大字旦野原 700 番地)

E-mail: y-tsurunari@oita-u.ac.jp

Key Words: synthetic aperture radar (SAR), differential interferometric SAR (DInSAR), ALOS-2, landslide, Bungoono city Asaji area

1. まえがき

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¹⁾。干渉 SAR 解析は、地球を周回する軌道からの合成開口レーダー (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、陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2/PALSAR-2) の合成開口レーダーは、だいち 1 号と比較して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地表面運動を検出することが可能である²⁾。

これまで、多くの研究が干渉 SAR 解析を斜面変動状況の把握に適用してきた。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、地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、地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³⁾は、白山甚之助谷と湯ノ谷周辺における干渉 SAR 解析により、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⁴⁾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、干渉 SAR 解析の斜面変動による実効性を確認した。また、福田ら⁵⁾は干渉 SAR 解析を小規模地すべりに対して適用した。そして、地すべりの輪郭などの傾向は得られたが、様々なノイズ等によりわかりやすい結果にはならなかったと報告している。

現状では、干渉 SAR 解析に必要な衛星データは、継続して収集されている。また、ALOS-2 は従来よりも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、地表面変動をより明確に捉えることができる。さらに、L バンドを利用しているため、樹木の影響が少なく、

広い範囲の地表面変位を把握できる。

本研究は ALOS-2 が取得したデータを用いて、差分干渉 SAR 解析を実施し、2017 年 5 月での豊後大野市朝地地区で発生した地すべり問題へ適用した事例報告となる⁶⁾。解析より検出された変位領域はドローンを用いて撮影・測量した三次元点群データから算出された地すべりブロックに対応しており、得られた結果から差分干渉 SAR 解析による地すべり変位監視の有効性を検証した。

2. 干渉 SAR 解析²⁾

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 に干渉 SAR の概念図を示す。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。

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 (アセンディング) と南行軌道 (ディセンディング) 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、図-3 に示されるように、ALOS-2/PALSAR-2 の高分解能モードの場合、おおよそ 30° ~ 40° である。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。

3. 差分干渉 SAR 解析⁷⁾

差分干渉 SAR 解析⁷⁾ (Differential Interferometry SAR) 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。

差分干渉 SAR 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

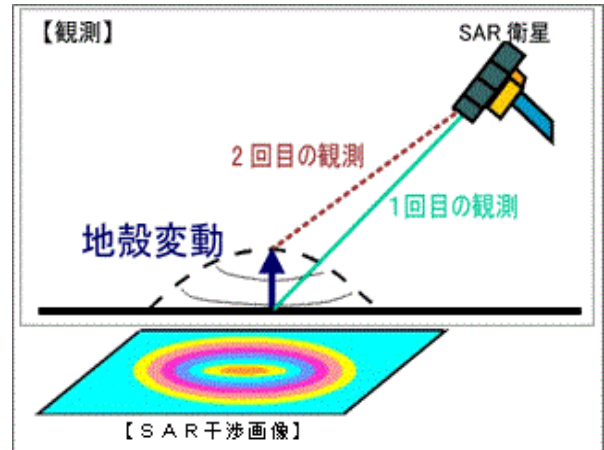


図-1 干渉 SAR の概念図



図-2 衛星の進行方向

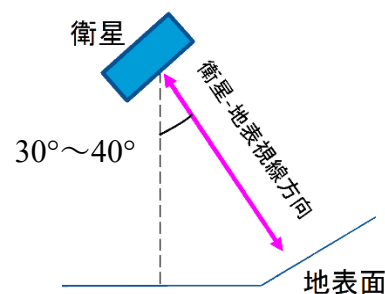


図-3 衛星の撮影角度

局所的な地表面変位を捉えることができる。干渉 SAR 解析手順の概要を、図-4 に示す⁸⁾。差分干渉 SAR 解析は、ほぼ同一の軌道上から観測された 2 時

期の SAR データを用いて、2 時期の SAR データの位相差を求める。基準となる時期のデータをプライマリーデータ、もう一方をセカンダリーデータと呼ぶ。このとき、各々の SAR データ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。プライマリーデータとセカンダリーデータと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 データ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、平坦地表面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、地形縞は、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

2017 年 5 月 16 日に地割れが発生した朝地町綿田地区の地すべりについては、5 月 6 日に亀裂が発見された。地割れが現れたのは、市中心部から 10 キロ以上西にある朝地町綿田地区の棚田である。東西約 300m、南北約 400m の範囲で、亀裂が広がり崩れ落ちた田もある。市によると、水田 12 ヘクタールのうち 8.2 ヘクタールで耕作できなくなった。写真-1 には、田んぼに現れた筋状の地割れと地割れの拡大状況の写真を示す⁹⁾。ドローン写真に対する差分干渉 SAR 解析の有用性としては、変位量の推定や進行状況の確認を実施することができる点である。

2017 年 5 月 16 日に初めて確認された地割れは急速に広がり、1 週間で 1 m 以上亀裂が開放した地点も存在し、非常に早い速度で地すべりが発生していることが確認された。26 日には幅の広がり1 時間あたり最大 2 センチと加速した。最終的には、警戒区域上部の亀裂は幅 5 m を超え、深度も 2 m に達した。

この区域に周辺の山地も含め、地すべり地形が分布しており、固結度の低い安山岩で構成されているため、同地区で発生した地すべりは風化岩地すべりと見なされた。なお、誘因としては、圃場への用水供給に伴う地下水の流入が考えられる。

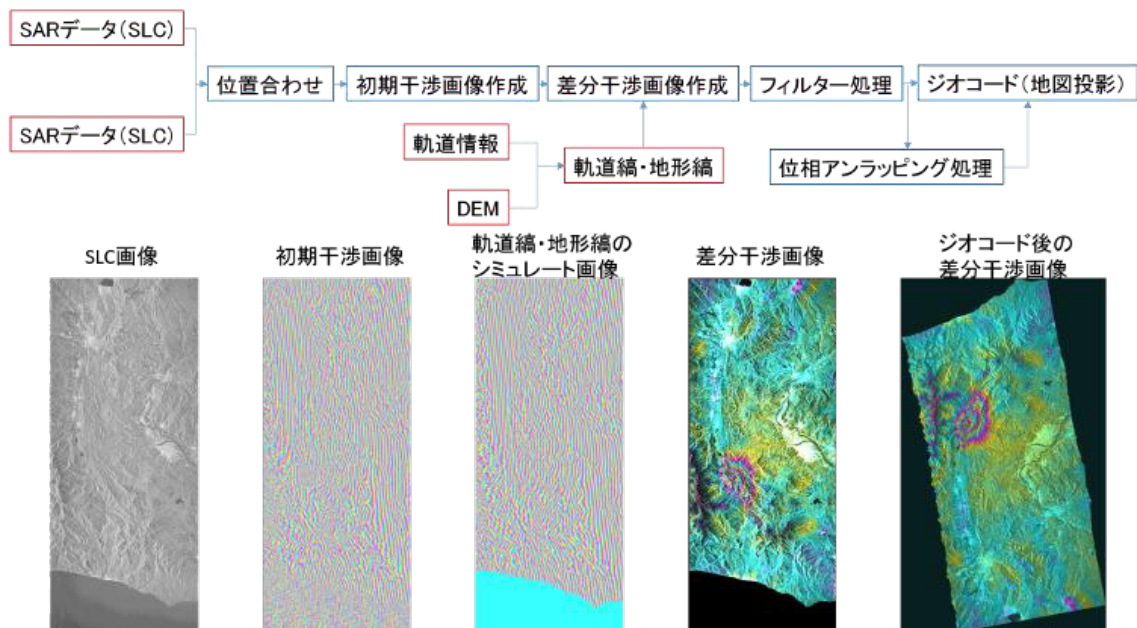
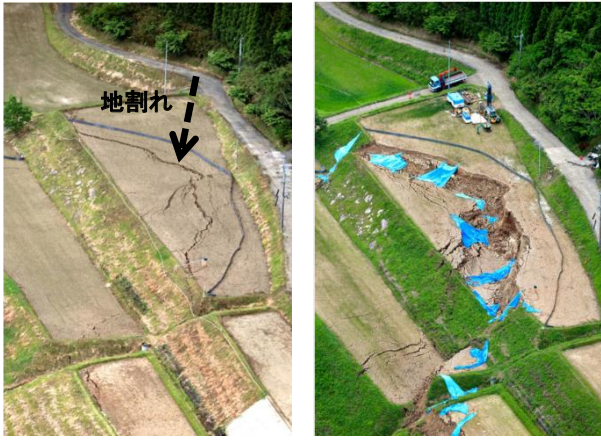


図-4 干渉 SAR 解析手順⁸⁾



(a) 田んぼに現れた筋状の地割れ (b) 筋状だった地割れの拡大

写真-1 崩壊状況 (撮影日: 2017. 6. 18)

5. 解析結果および考察

表-1 に示す干渉ペアで差分干渉 SAR 解析を行った。DEM には国土地理院の 10m メッシュ数値標高モデルを利用した。図-5 に衛星データの観測範囲を示す。SAR データに対して図-6 に示すポリゴン(多角形)を用いてサンプリングを行い、解析に使用した。図-5 では衛星画像左下にあたる区画南西部では山間部であるため、十分な地上基準点(GCP)を確保できず、広域的な誤差が生じる恐れがある。これらの地域を除いたサンプリング後のデータは区画全体から GCP を確保できるので、区画内での極端な変位は見られなかった。次に、解析結果を検証するために、大分大学減災・復興デザイン教育研究センターと日建コンサルタンツによる発災直後の 2017 年 5 月 28 日にドローンを用いて撮影・測量した三次元点群データ¹⁰⁾をもとに地すべりブロックを作成した(図-7, 図-8)。

解析はフルシーンデータ(衛星の観測範囲データ)とサンプリング済みデータ(区画全体から GCP を確保)の 2 パターンを用いて行った。グリッドサイズは 10m×10m とし、フィルタリングウィンドウサイズは 64 ピクセルとした。発災箇所周辺の各条件でのフィルタリング後の干渉画像、鉛直方向に投影した変位について、この地すべりブロックとともに図-9, 図-10 に示す。これを見ると、本研究で捉えられた変動量は、実際の地すべりブロックと一致していることがわかる。また、発災箇所周辺については表-2 に示すように、サンプリングによる大きな値の変化は認められなかった。

表-2 に示す通り、発災箇所では 9-10 cm 程度の沈降が認められ、図-9, 図-10 に示すように、作成した地すべりブロックと変位が計測された範囲がおおむね一致した。この結果より ALOS-2 データを用いた差分干渉 SAR 解析ではより明瞭に変動域を捉えられ、変動している地すべりブロックの把握が可能であることがわかる。フルシーンやサンプリング済みデータによる解析結果ともに、地すべりブロック内部に変位が認められた(地すべり頭部にマイナス変位, 地すべり下部にプラス変位)。このような南北方向の地すべりでも頭部の段差が大きいいため、地すべりの様子のある程度定量的に捉えることができた。

表-1 解析を行った干渉ペア

プライマリーID	セカンダリーID	期間	軌道	基線長(m)
ALOS2148302950-170220	ALOS2162792950-170529	2017(H29)年 2月20日ー 2017(H29)年 5月29日	南	14.3

表-2 サンプリングの有無による解析結果の違い

解析条件	衛星視線方向の最大変位	鉛直方向の最大変位
フルシーン	約-8.3 cm	約-10 cm
サンプリング済み	約-7.9 cm	約-9.5 cm

6. 災害収束後の現地調査

2023 年 4 月初旬に現地調査を実施した。写真-2, 写真-3 には下方と上方からの全景を示す。すでに農業は実施されており、地すべり下方の道路沿いには災害伝承碑が令和 4 年 11 月に建造されていた。なお、写真-3 にも見られるように、数多くの地すべり対策のための集水井工が平成 30 年 6 月と令和 4 年 3 月に完成していた。現在もなお、集水と排水機能がうまく働いていることが目視で確認でき、発災時には地下水流入がかなり大きい地域であったことを実際に観察できた。



図-5 衛星観測範囲（赤枠）



図-6 サンプルに用いたポリゴン（青枠）

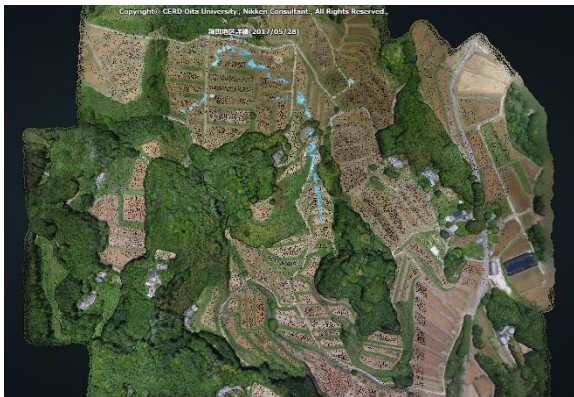
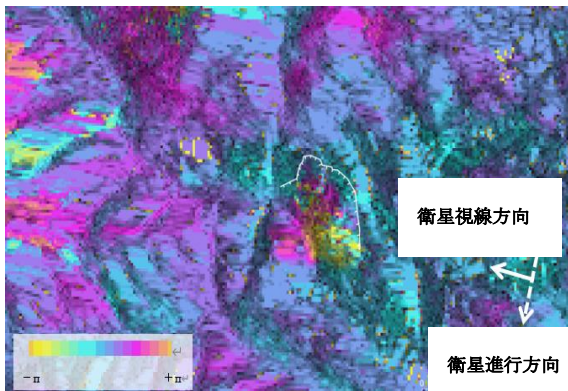


図-7 大分大学減災・復興デザイン教育研究センターによる朝地地区地すべり3次元データ



図-8 図-7から作成した地すべりブロック（背景はgoogle hybrid）

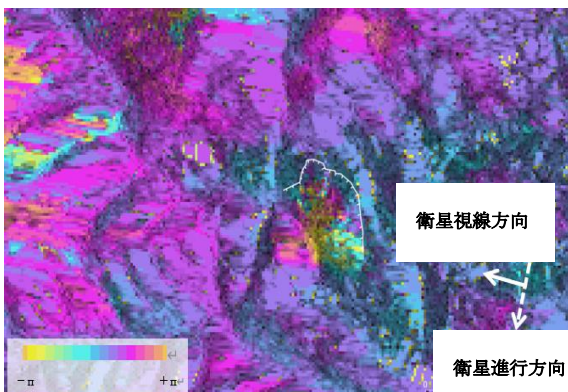


(a) フィルタリング後の干渉画像



(b) 解析結果鉛直方向変位

図-9 フルシーンでの解析結果



(a) フィルタリング後の干渉画像



(b) 解析結果鉛直方向変位

図-10 サンプル済みデータによる解析結果



写真-2 下方からの全景（撮影日：2023. 4. 9）



写真-3 上方からの全景（撮影日：2023. 4. 9）

7. おわりに

この研究では、ALOS-2によって得られたデータを差分干渉 SAR 解析に適用した。2017年2月から2017年6月の間に、豊後大野市朝地地区で災害が発生した地域は、約9-10 cmの沈下が見られた。そして、その結果に基づいて、衛星データのサンプリングと解析を使用して、斜面災害の危険な箇所を検証した。

これらの結果から、差分干渉 SAR 解析によって検出された変位領域は、ドローンを用いて撮影・測量した三次元点群データから算出された地すべりブロックにおおむねうまく対応していた。また、この研究により、今回のような南北方向の地すべり（長さ南北約400m）でも頭部の段差が大きいため、地すべりの様子のある程度定量的に捉えることができた。

今後、地盤変動が著しい地域の地すべり状況を考慮し、差分干渉 SAR 解析の適応性を引き続き検証する予定である。また、様々の条件下での結果と比較して、最適条件を決めることが精度を高めるための課題である。さらに、ノイズの問題やデータが高価なことにも課題が残ると言える。しかし、現地へ赴かず定期的に（現状では年に3~4回程度）観測が可

能であり、地すべり発生規模や変位速度等を加味したリスクランクに応じ、その適用性を検討する価値は十分あると考える。さらに、将来的に衛星の数が増えればその適用性は広がり、現状では航空レーザー測量(LP)データとの相互補完などが有効と考えられる。

参考文献

- 1) 佐藤浩, 岡谷隆基, 小荒井衛, 鈴木啓, 飛田幹男, 矢来博司, 関口辰雄: SAR 干渉画像を用いた地すべり地表変動の検出について—山形県月山周辺を事例にして—, *Landslides*, Vol.49, No.2, pp.61-67, 2012.
- 2) 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.
- 3) 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して—, *応用地質*, Vol.57, No.6, pp.289-294, 2017.
- 4) 神山嬢子, 國友優, 坂上雅之, 長井義樹: 干渉 SAR 解析による斜面変動範囲推定手法の検討, *写真測量とリモートセンシング*, Vol.55, No.3, pp.187-190, 2016.
- 5) 福田和純, 山本健太郎, 永川勝久, 吉川猛, 吉田美月, 鶴成悦久: 現地調査と衛星 SAR を用いた斜面災害危険箇所の検証, 斜面崩壊と雨の降り方の関係に関するシンポジウム 北九州 2022 論文集, pp.29-34, 2022.11.
- 6) 山本健太郎, 永川勝久, 吉川猛, 吉田美月, 鶴成悦久: 衛星 SAR を用いた地すべり災害危険箇所の検証, 自然災害研究協議会西部地区部会報・論文集-47号, pp.25-28, 2023.2.
- 7) 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—, 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.
- 8) 国土地理院ウェブサイト, SAR 干渉画像の作成手順, https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_procedure.html, 2022.5.1.
- 9) 菊地洋行, 小林舞子: 大分の地割れ, 確認から1カ月地下水位の上昇が原因か, 朝日新聞デジタル, <https://www.asahi.com/articles/ASK6F55LPK6FTPJB00T.html>, 2017.6.18
- 10) 大分大学減災・復興デザイン教育研究センター, 豊後大野市朝地町綿田地区地すべり現場ドローン三次元データ, <http://www.cerd.oita-u.ac.jp/uav/examples/watada>, 2017.5.28.

(2024. 5. 31 受付)