

No.5

## 『能登半島地震における SAR 衛星を活用した地盤変動監視事例』

株式会社フジヤマ DX 推進部

神谷咲季 山浦篤 森下和樹 山田泰暉

### 1. はじめに

#### 1-1. 背景

能登半島地震は 2024 年 1 月 1 日に発生し、石川県輪島市および志賀町で震度 7 を観測した。地震後の必要な対策を判断するため、迅速かつ継続的な地盤変動のモニタリングが求められた。

SAR (合成開口レーダー) 衛星の利用が地盤変動の抽出に有効であることが示されており、本調査では、地震後の SAR 衛星画像の干渉解析を用いた地盤変動の抽出、および地震前後の航空レーザ測量、UAV レーザ測量の地形データを用いた数値地形モデル差分解析の結果に加え、現地調査で確認した結果を報告する。あわせて、従来手法との比較を通じて、本手法による効率化の効果を定量的に示す。

#### 1-2. 業務概要

(1) 調査箇所：石川県鳳珠郡穴水町由比ヶ丘地区  
由比ヶ丘団地

(2) 調査面積：約 0.2 km<sup>2</sup> (図-1)

(3) 調査期間：2024 年 1 月～12 月

(4) 使用技術：干渉 SAR 解析、UAV レーザ測量、航空レーザ測量

地震後の対策を検討する際、自然地形か造成地等の人工地形であるかは重要な指標である。国土地理院の地図・空中写真閲覧サービスにおいて、1968 年 6 月 6 日撮影画像と 1975 年 5 月 8 日撮影画像を比較すると、調査箇所が宅地造成に伴う大規模盛土造成地であることが確認された (図-2)。

したがって、本調査は人工地形の大規模盛土造成地であることを念頭に置き、地理的要因を

考慮した監視手法を適用して遂行した。



図-1 調査対象範囲（広域図）



図-2 宅地造成状況の把握

### 2. 課題・問題点

#### 2-1. 観測精度および特徴

地盤変動の観測において、従来の測量手法では広域かつ詳細な変動量を把握することに限界がある (従来手法：地図情報レベル 500, 観測範囲 1 km<sup>2</sup> の場合、約 300 万円/回<sup>1</sup>)。特に大規模盛土造成地における微小な変動は地盤沈下や斜面崩壊などの前兆現象を捉える上で重要である。航空機の運航費用や専門的な機器の調達・維持費用、熟練した技術者の確保などにより、測量コストが高額とな

## 様式 2

表－2 SAR衛星（Sentinel-1）解析使用データ

項目	内容
Sentinel-1 のデータ	2/16, 2/28, 3/11, 3/23, 4/4, 4/16, 4/28, 5/10, ※いずれも 2024 年 5/22, 6/3, 6/15, 7/9, 7/21, 8/2, 8/14, 8/26, 9/7, 9/19, 10/1, 10/13, 10/25
解析方法	干渉 SAR 解析

表－3 SAR衛星（ALOS-2）解析使用データ

項目	内容
ALOS-2 のデータ	1/17, 1/28, 4/10, 5/19, ※いずれも 2024 年 9/22, 12/18
解析方法	干渉 SAR 解析

次に衛星による干渉 SAR 解析技術導入理由を示す。

### （1）干渉 SAR の観測精度及び特徴

干渉 SAR 技術は同一地域を異なる時期に観測した SAR 画像の位相差から地表面の変動を面的に捉えることが可能な高精度リモートセンシング技術である<sup>2</sup>。この技術により数cm単位の変動検出精度を実現し、従来の測量手法では困難であった広域かつ詳細な地盤変動の把握が可能となる。特に ALOS シリーズ（JAXA）に搭載されている L-バンド SAR は植生の影響を受けにくく、地表面の変動を高精度で捉えることができる<sup>3</sup>。また、衛星による SAR データ取得は地上に観測機器を設置する必要がなく、アクセス困難な被災地域においても安全に観測を実施できる利点がある。

### （2）SAR衛星の観測時の気象条件

SAR衛星はマイクロ波を用いるため被雲下や夜間でも広域の地盤変動を把握可能である。このため、光学衛星では観測困難な気象条件下でも、マイクロ波は、地表面の情報の取得が可能である。能登半島の冬季に多い曇天条件下においても安定したデータ取得が可能である。また、SAR衛星は昼夜を問わず観測可能であり、緊急時の迅速な情報収集に貢献する。

表－1 レーザ測量解析使用データ

項目	内容
航空レーザ測量	2024/3 0.5mDEM
UAV レーザ測量	2024/6 0.5mDEM
解析方法	差分解析

ることが多く、継続的な監視や頻繁な測量実施の制約要因となっている。また、急傾斜地や被災地域へのアクセスが制限される状況下での観測点の設置を含む測量作業は、作業員の安全確保の観点からも課題が多い。

### 2－2. 観測時の気象条件

能登半島は日本海側気候に属し、冬季は降雪や強風の影響を受けやすい地域である。地震発生が1月であったことから、現地調査や航空測量において気象条件による制約が大きかった。特に強風条件下では UAV や航空機の飛行が制限される。また、雲や霧による視界不良は光学衛星画像、UAV や航空機による写真測量の品質低下を招く。これらの気象条件は迅速かつ高品質な災害対応に必要な情報収集の制約要因として作用する。

### 2－3. 継続的な監視の必要性

地震後の地盤は余震や降雨による二次的な変動が発生する可能性が高く、特に大規模盛土造成地では地震による緩みが進行性の地盤変動につながる危険性があり、長期的かつ継続的な監視が不可欠である。従来の測量手法ではコスト面や人的リソースの制約から高頻度での継続監視が困難である。地震による変動を観測するためには定期的かつ同一条件での観測データの蓄積が必要となるが、これを実現する手法の確立が課題となっている。

## 3. 対応策と適用結果

### 3－1. 対応策

2. にて課題として挙げられた事項の対応策として、SAR衛星による観測と現地調査、UAV レーザ測量を組み合わせた手法を用いることとした。次に解析に用いたデータの詳細を示す。

## 様式 2

### (3) SAR 衛星を用いた継続的な監視

SAR 衛星による定期的な観測は地盤変動の時間的变化を捉える上で有効である。ALOS-2 は 14 日、Sentinel-1 は 12 日の回帰日数を持ち<sup>4</sup>、定期的な観測が可能である。これにより地震後の地盤変動の進行状況を継続的に監視し、二次災害の予兆を早期に検知することができる。さらに干渉 SAR による面的な変動情報と UAV レーザ測量による詳細な地形データを組み合わせることで、マクロとミクロの両面から地盤変動を評価できる。このような複合的な監視体制を構築することにより、大規模盛土造成地における長期的な安全性評価と早期警戒システムの構築が期待できる。

## 3-2. 適用結果

### (1) 現地調査結果



図-3 現地調査結果

現地調査では、法面上部（南側）の宅地で横ズレ、深さともに 1m 以上のクラックが発生し、地滑りが確認された。また、法面には漏水も複数箇所で確認された。これらの現地調査結果は大規模盛土造成地における地震被害の特徴を示すとともに、今後の詳細分析の基礎データとして活用される。

### (2) レーザ測量結果

航空レーザ測量（2024 年 3 月）および UAV レーザ測量（2024 年 6 月）により地震後の詳細な地形データを取得した。また、数値標高モデル（DEM）の差分解析を実施し、地震後の地盤変動がないか調査した。その結果、南北方向の大きな変動は観測されなかったが、東西の法面において 1m 程度の標高差が見られた。しかしながら、法面におけ

る標高差は測量誤差の可能性があり、別の測量方法での検証を行う必要があった。したがって、数 cm 単位で地盤変動を観測可能な干渉 SAR による地震後の継続的な地盤変動監視を行うこととした。

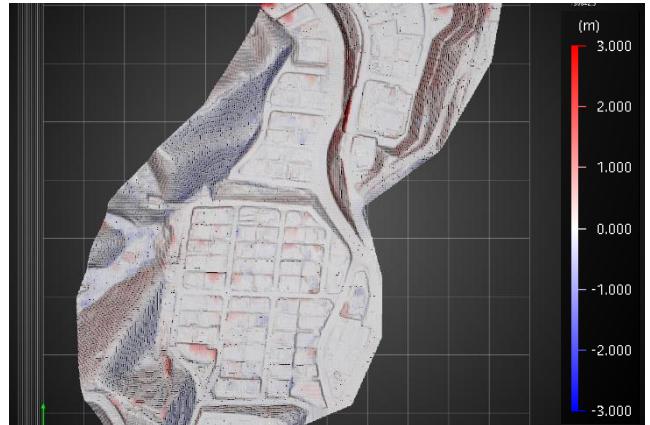


図-4 DEM 差分

### (3) SAR 衛星観測結果

無償衛星の Sentinel-1 による干渉 SAR 解析の結果、由比ヶ丘団地北西の斜面において地震後で最大 5cm 程度の沈下が確認された（図-5）。従来の地上測量では同範囲の調査に約 2 週間を要するが、SAR 解析では 3 日で完了することができた。



図-5 Sentinel-1 解析結果

対策工事の必要性を適切に判断するため、発災以降における継続的な地盤変動の有無を確認することが重要である。Sentinel-1 の解析結果は 30 m<sup>2</sup> 単位であり、詳細な地盤変動の把握のため、より解像度が高い有償衛星の ALOS-2 を用いることとした。

解析の結果、対象地域において、5 月時点では 3 cm 程度の地盤変動が観測されたが（図-6）、12 月

時点では 1cm 以上の大変動は観測されず（図-7），発災後の継続的な地盤変動は発生していないと判断された。

この結果は，現地での地盤調査および UAV レーザ測量による点群データ解析結果を補完し，総合的な地盤安定性評価を可能とした。これらの SAR 衛星による観測結果は，地震後の地盤変動を面的かつ継続的に捉え，二次災害リスク評価のための重要なデータとなっている。

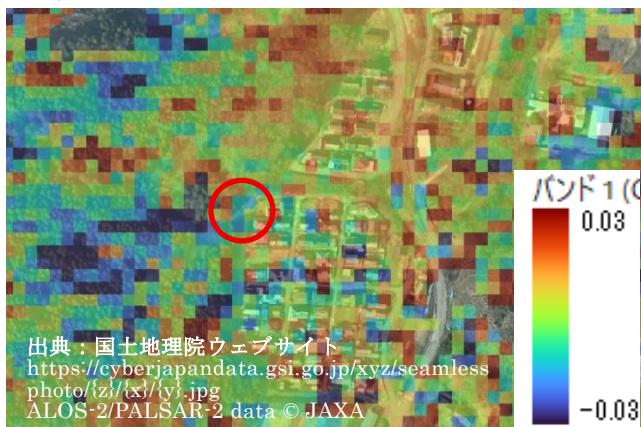


図-6 ALOS-2 解析結果 2024/1/28-2024/5/19



図-7 ALOS-2 解析結果 2024/4/10-2024/12/18

#### 4. おわりに

##### 4-1. SAR 衛星技術の課題

SAR 衛星技術には課題もある。①標高の取得が困難であるため，地盤変動の絶対値を正確に把握することが難しい。しかし、UAV レーザ測量や航空レーザ測量を組み合わせることで，標高を補完し，より詳細な地盤変動の評価が可能となる。また，②SAR 衛星は軌道上の制約から南北方向の変動を捉えることが困難なため，東西方向の変動に比べて精度が低くなる傾向がある。

##### 4-2. SAR 衛星技術の有効性

SAR 衛星技術は，地盤変動の面的な把握に優れており，能登半島地震のような大規模な地震災害において有効性が確認された。本事例では，①従来手法と比較して作業時間を 60% 短縮，コストを 30% 削減し，さらには監視精度を ± 数十 cm から ± 数 cm に向上させることができた。②この技術は，急傾斜地やアクセスが困難な地域において，地上に観測機器を設置する必要がないため，安全かつ効率的に観測を行うことができる。また，③植生の影響を受けにくい L-バンド SAR を用いることで，森林地域でも高精度な地形改変の把握が可能である。以上から，地震や土砂災害のリスク評価や対策工事の必要性判断に貢献することが期待される。

##### 4-3. 能登半島における対応

能登半島地震における地盤変動の抽出では，①複数の手法を組み合わせることにより，広域かつ詳細な地盤変動の把握が可能となり，二次災害の予兆を早期に検知することができた。特に，②SAR 衛星は，気象条件，昼夜を問わず，技術者の侵入困難箇所でも観測可能であるため，迅速な災害対応に貢献する。さらに，③過去に取得されたアーカイブデータとの比較により，地震前後の変位量を定量的に評価することも可能である。現地調査，UAV レーザ測量，SAR 衛星観測の複数手法を組み合わせることが重要であると再確認した。

##### 4-4. まとめ

標高の補完や南北方向の変動把握の精度向上を図りつつ，複合的な地盤変動のモニタリング体制を構築し，災害対応をより効果的にすることが必要である。また，ALOS-4 の導入により，広域の観測が可能となり，観測頻度が向上し，より迅速かつ継続的な地盤変動の監視が可能となることが期待される。

##### 参考文献

- 測量業務等積算資料
- 衛星 SAR 上下変動測量マニュアル，国土地理院，2024
- ALOS-2 仕様書，JAXA
- Sentinel-1 仕様書，ESA