

ダム貯水池周辺斜面の変動監視における衛星SARの活用

佐藤弘行・石川亮太郎・金銅将史

1. 研究の背景と目的

衛星SAR (Synthetic Aperture Radar、合成開口レーダー) は夜間や雨天時にも地表面の起伏等の計測が可能な技術であり、また広域での計測も可能なため、地震や火山活動による地殻変動や地すべりの把握等に活用されている。国総研では、構造物のうち特に規模が大きいダム等を対象として、その平常時や災害時における維持管理の高度化・効率化に資することを目的に衛星SARデータの活用について検討してきた。これまでの検討で、干渉SAR解析¹⁾等により、ロックフィルダム堤体の外部変形が概ね5mmの精度で計測可能なことなどがわかっている²⁾。

ダム管理では、ダム堤体等の構造物とともに貯水池周辺斜面もその対象となっている。貯水池周辺斜面は広範囲に及ぶこともあり、そのモニタリング方法の合理化に対するダム管理者の関心が高い。そこで本稿では、衛星SARデータを用いた貯水池周辺斜面の変動領域や変動方向の把握可能性について検討した結果を報告する。

2. 検討対象とした貯水池周辺斜面

本検討では、管理者等による地表での計器観測や巡視により斜面変状が確認され、監視対象となっている貯水池周辺斜面の1つとその周辺を検討対象領域とした(図-1)。当該領域は平均勾配約15°の全体的には比較的緩やかな斜面で、貯水池近傍(同図下方)や領域内の道路とその周辺で段差等の変状が確認されている箇所がある。ただし、貯水池から離れた標高が高い領域(同図上方)では、植生の繁茂や積雪のため、地表での目視による変動領域の把握は困難な状況である。

3. 使用した衛星SARデータ等

本検討では、2014年5月に打ち上げられ、運用中



図-1 検討対象の貯水池周辺斜面の航空写真

のだいち2号 (ALOS-2、Advanced Land Observing Satellite 2) により2014年から2018年までの約4年間に観測されたSARデータ(北行軌道6シーンと南行軌道10シーン)を用いた。なお、積雪がある冬期のデータは、干渉SAR解析では積雪深の面的な把握が難しいため使用していない。

だいち2号に搭載されているセンサの観測波長はLバンド(23.6cm)、観測されたデータの空間解像度は3mである。干渉SAR解析において地形縞³⁾の除去に必要な数値地形モデル(DEM、Digital Elevation Model)は、航空機レーザスキャナにより取得・作成されたデータを用いた。

4. スタッキング解析によるノイズの低減

先に検討したロックフィルダム堤体の場合、その表面はリップラップ材(岩石質の保護材)に覆われて植生は基本的になく、衛星SARでの変位計測²⁾では表面の状態に起因するノイズの影響は小さかった。一方、貯水池周辺斜面の場合、植生に覆われていること、また植生の状態が季節により変化することなどから、2シーン(1ペア)の衛星SARデータを用いる干渉SAR解析では、地表変位の計測誤差(ノイズ)が大きくなる場合がある。

そこで本検討では、複数ペアの干渉SAR解析結果を用いるスタッキング解析⁴⁾と呼ばれる手法を用

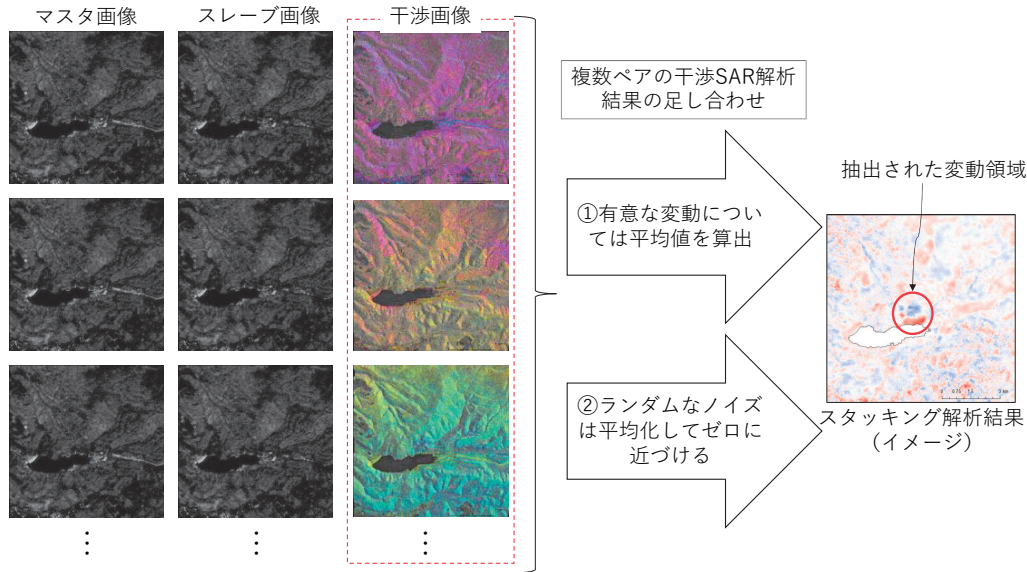


図-2 複数ペアの2時期のSAR画像（マスタ画像とスレーブ画像）を用いるスタッキング解析のイメージ

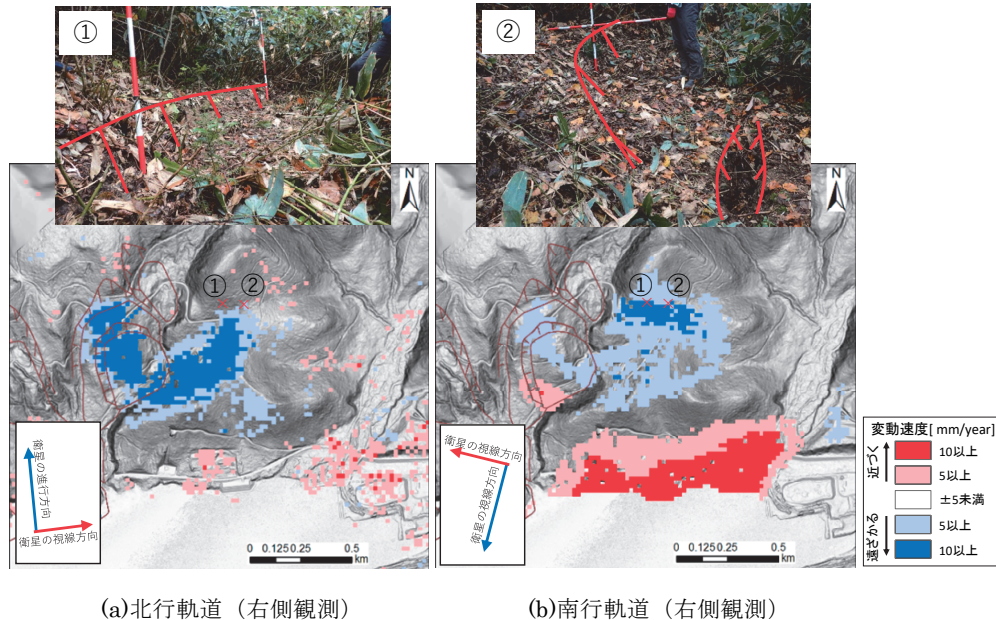


図-3 スタッキング解析結果と新たに確認された変状

いた。通常の干渉SAR解析では、2シーン（2時期）の間での地表変位量が算出されるが、スタッキング解析では、複数の干渉SAR解析結果を足し合わせることで、最初の観測から最後の観測までの複数ペアの平均的な変位量が算出される（図-2）。これにより、ランダムなノイズ成分が相殺され、ランダムではない変動（ここでは図-2の赤丸部）を効率的に抽出できる。

検討対象領域でのスタッキング解析の結果を図-3に示す。北行軌道での観測データからは、衛星から遠ざかる方向の変動領域（青色）が抽出された。一方、南行軌道では、貯水池近傍にでは衛星に近づく

方向の変動領域（赤色）、貯水池から離れた標高の高い領域では衛星から遠ざかる方向の変動領域（青色）がそれぞれ抽出された。なお、北行軌道と南行軌道で観測される変動領域の位置が異なるのは、後述のように衛星SARで得られる地表変位が衛星の右側観測の視線方向の変位量となることに起因する。

なお、この解析結果をもとにダム管理者による現地確認が行われた結果、図-3に示した変動領域とその周辺の境界付近において、図-3に合わせて示した段差等の変状（写真中に赤線で図示）が新たに確認された。また、図-3に示した変動領域の境界と、既に把握されていた変状箇所が良好に一致す

ることを確認した。これらのことから、本検討のようなスタッキング解析は、植生によるノイズを抑えて貯水池周辺斜面の変動領域を衛星 SAR データから抽出するうえで有効な手法であると考えられる。

5. 斜面の変動方向の推定

SAR衛星により観測される地表変位は、衛星からの視線方向の変位量となる。そのため、図-4に示すように、衛星の視線方向と斜面の向きあるいは斜面の変動方向の関係により、北行軌道と南行軌道では観測される変位の方向が異なる場合がある。なお、同図中に赤い破線で示した箇所のように、斜面の向きと斜面の変動方向によっては、斜面が斜め下方に変動しているにもかかわらず、衛星に近づく方向の変動として捉えられる場合もある。また、衛星の視線方向に直交する方向の変動については観測することができない。そのため、斜面の実際の変動方向を適切に把握するには、衛星の視線方向と斜面の向きの関係を考慮する必要がある。

以上のことを踏まえ、図-3において抽出された変動領域の変動方向を図-5に示す(ア)から(オ)の各小領域について、それぞれ次のように推定した。

(ア)南～南東向きの比較的フラットな斜面である。

図-5の北行軌道のデータによる結果では、衛星の視線方向にはあまり変動していない。一方、南行軌道の結果では、衛星の視線方向に近づく方向の変動を示している。これらのことから、北行軌道での衛星の視線方向と直交する南南東方向への水平変動、あるいは南南東方向成分を有する隆起が生じているものと推定される。

(イ)南～東向きの斜面である。図-5の北行軌道のデータによる結果では、衛星の視線方向にはあまり変動していない。一方、南行軌道の結果では、衛星の視線方向に遠ざかる方向の変動を示している。これらのことから、北行軌道での衛星視線方向と直交する南南東方向への水平変動、あるいは南南東方向成分を有する沈降が生じているものと推定される。

(ウ)西～南向きの斜面である。図-5の北行軌道および南行軌道のデータによる結果では、ともに衛星の視線方向に遠ざかる変動を示している。これらのことから、沈降もしくは北東～北方向へ

の水平変動の可能性が考えられるが、後者では斜面の向きからは重力に逆らう方向となるため、沈降が生じているものと推定される。なお、図-3に示した変状は、本小領域の上端部にあたるものと推定される。

(エ)南～東向きの斜面である。図-5の北行軌道および南行軌道のデータによる結果では、ともに衛星の視線方向に遠ざかる変動を示している。これらのことから、沈降もしくは北東～北方向への水平変動の可能性が考えられるが、後者では斜面の向きからは重力に逆らう方向となるため、沈降が生じているものと推定される。

(オ)南～東向きの斜面である。図-5の北行軌道のデータの結果では、衛星の視線方向にはあまり変動していないが、南行軌道の結果では、衛星の視線方向に近づく方向の変動を示している。これらのことから、北行軌道での衛星の視線方向と直交する南南東方向への水平変動あるいは南南東方向の成分を有する隆起が生じているものと推定される。

以上を総合すると、検討対象領域では、概ね貯水池から離れた標高の高い領域については沈降、貯水池近傍では隆起する方向の変動が生じているものと推定される。このように、衛星 SAR データを用いて貯水池周辺斜面の変動方向を推定するには、北行軌道と南行軌道の両方の衛星 SAR データを用い、図-4に示すような衛星視線方向と斜面の向きの関係を考慮する必要がある。

6. おわりに

以上で述べたような方法を用いることで、衛星 SAR データを貯水池周辺斜面での変動領域の抽出や変動方向の推定に活用することが可能と考えられる。衛星 SAR は地上設備を必要とせず、変位量の面的な分布を広域的に得ることができる利点がある。従来から行われている地上での測量や各種計器観測、近年活用事例が増えつつある GPS 等と効果的に組み合わせることで、ダム堤体以外にも貯水池周辺斜面のモニタリングを高度化・合理化する有用な手法になるものと期待される。

2021年度にはだいち2号よりもさらに観測性能が向上しただいち4号 (ALOS-4) が打ち上げられる

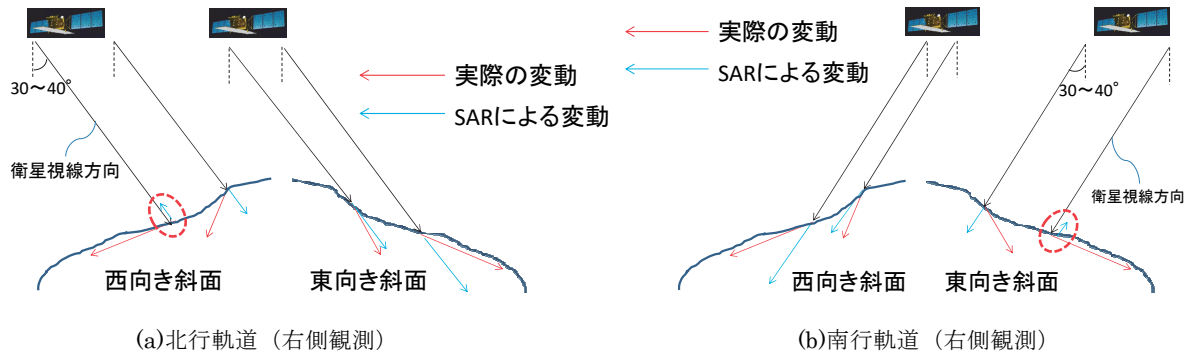


図-4 実際の斜面の変動方向と衛星SARにより計測される変動方向

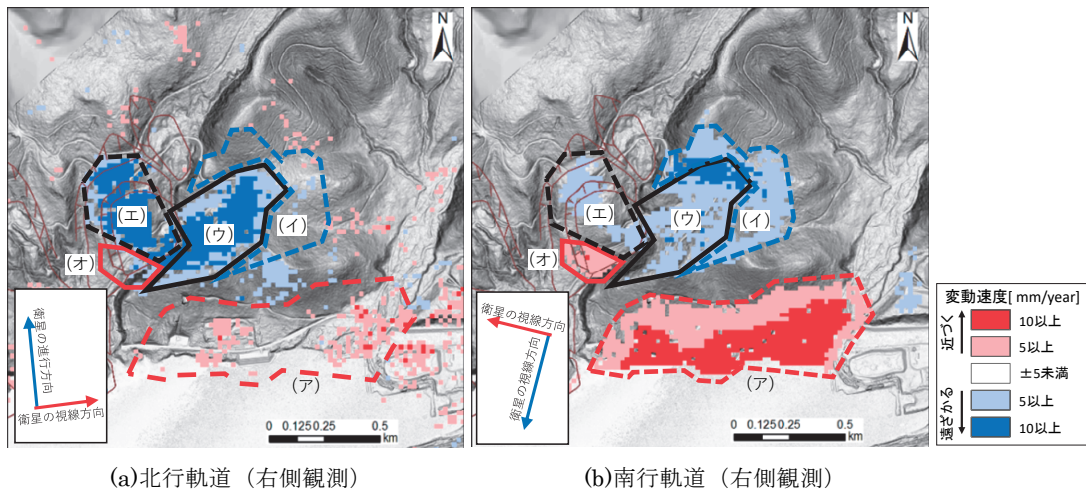


図-5 衛星の視線方向と斜面の向きを考慮した変動方向の推定

予定³⁾であり、空間解像度3mのSARデータの観測頻度が年4回から年20回に増加することなどにより、ダム管理分野を含め、インフラのモニタリングへのさらなる活用が期待される。

(注) 本研究は、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) のインフラモニタリング分野の個別課題「衛星SARによる地盤および構造物の変状を広域かつ早期に検知する変位モニタリング手法の開発」(H26～H30年度)の一部として実施したものです。

参考文献

- 1) 国土地理院：干渉 SAR
<http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/sar/>
- 2) 佐藤弘行、金銅将史、小堀俊秀、小野寺葵：衛星 SAR による 19 基のロックフィルダムの外部変形計測、土木技術資料、第 59 巻、第 9 号、pp.36～41、2017
- 3) 宇宙航空研究開発機構(JAXA)：だいち 4 号(ALOS-4)、<http://www.satnavi.jaxa.jp/project/alos4/>

佐藤弘行



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室 主任研究官
SATO Hiroyuki

石川亮太郎



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室研究官、現 東北地方整備局福島河川国道事務所工務第一課係長
ISHIKAWA Ryotaro

金銅将史



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部大規模河川構造物研究室長、博士(工学)
Dr.KONDO Masafumi

