

衛星 SAR による広域地すべり斜面モニタリングの検討 — 地表伸縮計測との比較 —

中電技術コンサルタント(株) ○岩田 直樹, 鹿瀬 一希
 西松建設(株) 高村 浩彰, 黒田 卓也
 琉球大学 伊東 孝, 藍檀 オメル, 渡嘉敷 直彦
 山口大学 清水 則一, 中島 伸一郎
 岩下建技コンサルタント(株) 兼村 友也

1. はじめに

近年、衛星 SAR データを利用して地表の変位を広範囲で面的に計測することが可能となり、継続的に観測されたデータを用いて、斜面変状や地表面沈下などの時系列変化をモニタリングする技術が確立されつつある。衛星 SAR は天候や昼夜に左右されず、現地に計測機器等を設置しないため、低コストで広範囲を把握できる可能性がある。しかし、観測される変位は衛星から地表を見たときの視線 (LOS) 方向の変位であることや、衛星 SAR がほぼ南北方向に周回して東西方向から観測しているため、軌道方向である南北方向の動きをほとんど検知できない。また、観測析果には変位以外の様々なノイズが含まれており、微小な変位を検出することは困難であるなどの課題も多い。

そこで本検討では、沖縄県中城湾周辺で地すべりが多発している地区を対象として、異なる方向 (東側および西側) から観測された衛星 SAR データを用いて時系列干渉 SAR 解析 (SBAS 解析) を行い、2 方向の結果を合成して斜面方向の時系列解析結果を算定して地すべり挙動を評価した。またその結果を伸縮計による実測値と比較して SAR による観測結果の妥当性を検討した。

2. 対象地点の概要

対象地点は、図-1 に示す沖縄本島の中南部に位置する中城湾周辺の斜面であり、地形的に東南方向に傾斜する比高差約 100m の段丘地形が海岸線とほぼ平行に連続している。この地域には、図-1 に示すように地形判読による地すべりブロックが多数分布している。この地域では、ほぼ全域にわたって島尻泥岩が分布しているが、風化に対する抵抗力が非常に弱いため軟質・土壌化しやすい特徴を有しており、表層から概ね 10~20m 以浅ですべりが発生している。

本検討では伸縮計が設置されている奥間地区を対象とした。図-2 に示す地形図に見られるように、地すべりブロックが多数存在する南東向き斜面が広く分布する。伸縮計は、勾配 20° 前後の南東向き斜面に、3 台(S-1~S-3)を斜面方向に数珠つなぎに配置して計測を行っている。

3. 時系列干渉 SAR 解析の概要と検討条件

本検討では、多数の差分干渉ペアを用いる時系列干渉 SAR のうち、斜面全体の面的な時系列変位を評価できる SBAS (Small Baseline Subset algorithm) を用い、ENVI SARscape Ver.5.6.2 ソフトウェア (sarmap 社) により解析を行った。時系列干渉 SAR による変位は、衛星から地表を見た LOS 変位であるため、一方向からの観測では水平方向か上下方向の変位かを判断できない。このため、衛星進行方向の異なるディセンディング (南行軌道, 東側から観測) とアセンディング (北行軌道, 西側から観測) の時系列 LOS 変位を用いて斜面変状を評価する。本検討では、斜面変状は斜面最急勾配方向への動きが主体で、それと直交する方向の変位は無視できると仮定し、斜面変動を図-3 に示す斜面最急勾配前面方向への水平変位 H と上下変位 V で表した。このベクトルを東西それぞれの方向の LOS 変位より次式により算定した。

$$H = (LOS_d \cdot \sin \phi_a - LOS_a \cdot \sin \phi_d) / \{ \cos(90 + \delta_a - \theta) \cdot \sin \phi_a \cdot \cos \phi_d - \cos(90 + \delta_a + \theta) \cdot \cos \phi_a \cdot \sin \phi_d \} \quad (1)$$



図-1 検討位置と SAR 解析範囲

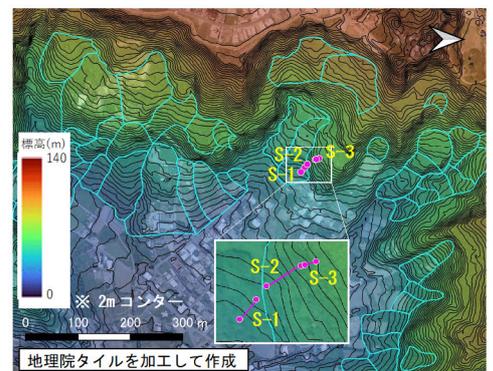
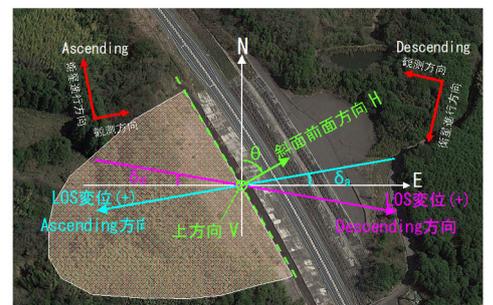


図-2 奥間地区の地形と伸縮計設置位置



$$\begin{aligned} \text{Ascending方向 LOS変位 (+)} &= H \cdot \cos(90 + \delta_a + \theta) \cdot \cos \phi_d + V \cdot \sin \phi_a \\ \text{Descending方向 LOS変位 (+)} &= H \cdot \cos(90 + \delta_d - \theta) \cdot \cos \phi_d - V \cdot \sin \phi_d \end{aligned}$$

図-3 斜面方向の変形ベクトル算定の概念図

$$V = (\text{LOS}_a - H \cdot \cos(90 + \delta_d - \theta) \cdot \sin \phi_a) / \sin \phi_a \quad (2)$$

ここで、LOSはLOS変位、 θ は水平変位Hの真北からの角度、 δ は衛星視線方向の東西方向からの角度、 ϕ は衛星の観測方向が水平面と成す角度を示し、添字aおよびdはアセンディングおよびディセンディングをそれぞれ意味する。

衛星 SAR データは、陸域観測技術衛星 2 号「だいち 2 号」(ALOS-2, 宇宙航空研究開発機構: JAXA) に搭載された L バンド波長の合成開口レーダ (PALSAR-2) を用いた。アセンディングは 2014 年 9 月 26 日～2022 年 7 月 22 日 (計 24 シーン), ディセンディングは 2015 年 2 月 28 日～2022 年 6 月 11 日 (計 26 シーン) の SAR データを用いて解析を行った。なお, SAR 解析における評価単位 (ピクセル) は 10m×10m とした。

斜面最急勾配方向は, 国土地理院の 5mDEM データを用いて SAR の評価点毎に標高を算定し, 該当する評価点とその周辺の評価点の標高より算定した。評価単位が 10m であることから, 評価点の周囲 10m の平均的な斜面最急勾配とその方向になっている。

4. 斜面方向の変動算定結果と実測値との比較

図-4 および図-5 は斜面最急勾配方向への水平変位と上下変位の年平均変化量 (変位速度) 分布を示す。変位速度は, 変位の時系列データを最小二乗法により直線近似したときの傾きである。水平変位は斜面前面方向をプラス, 上下方向は沈下をマイナスとしている。伸縮計の南側では, 地形判読による地すべりブロックは, 水平変位 20mm/年以下, 沈下 10mm/年以下と比較的小さな動きであるのに対して, ブロック背後の急峻な斜面部では 20mm/年を超える水平変位と 10mm/年を超える沈下が生じている。なお現地踏査でも, 滑落崖背後の斜面で崩壊が進んでいることを確認しており, 現地状況とも整合した結果となっている。また, 地形判読による地すべりブロックに沿って変状が生じていることから, 提案手法により評価することで, 斜面方向の異なる斜面に対して適正に面的な評価を行えるようになってきていることが分かる。

伸縮計による実測値との比較に当たっては, 伸縮計の固定杭と移動杭の位置するピクセルの時系列変位データを用いて, 固定杭と移動杭の位置の相対的な長さの変化を算定して比較した。図-6 に SAR 解析結果と実測値の比較を示す。なお, 伸縮計による計測は, S-1 は 2019 年 12 月から, S-2 と S-3 は 2021 年 9 月から行っている。SAR 解析結果は, アセンディングおよびディセンディングの両方のデータがある 2015 年 2 月～2022 年 6 月のデータが得られているが, 伸縮計の計測開始日からの相対的な変化を実測結果と比較した。S-1 および S-2 は実測結果とよく整合した結果となっているが, S-3 は変状を捉えられていない。これは, S-1 および S-2 は, 伸縮計の延長がそれぞれ 12m, 17m であるのに対して, S-3 は滑落崖を跨いで 5m と短いためと考えられる。本検討では, SAR 解析結果のばらつきを小さくするために, 10m×10m のピクセル内の SAR データを平均化して解析に用いている。このため, 隣り合うピクセルで評価した場合には, 変化を捉えづらくなった可能性が考えられる。

5. おわりに

地すべりが多発する沖縄県中城湾周辺斜面について, 2 方向からの衛星 SAR データを用いて斜面方向の変位速度分布を算定するとともに, 斜面方向変位の時系列データを伸縮計の実測値と比較した。その結果, 斜面方向が異なる地すべりに対して提案手法を用いることで面的な変動を評価でき, 伸縮計の実測値とも比較的良く整合する結果が得られた。今後は, 他地区の伸縮計の実測値との比較を行い, 提案手法のモニタリングへの適用性を引き続き検討していく予定である。

謝辞: 本研究は, 中電技術コンサルタント(株), 西松建設(株), 岩下建技コンサルタント(株), 琉球大学, 山口大学の共同研究として実施した。また, 山口大学と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) との連携協力協定に基づき JAXA から提供された ALOS-2/PALSAR-2 データを用いた。ここに記して関係者各位に謝意を表す。また本研究の実施にあたり, 貴重な資料をいただいた沖縄県中部土木事務所の各位に深く御礼申し上げます。

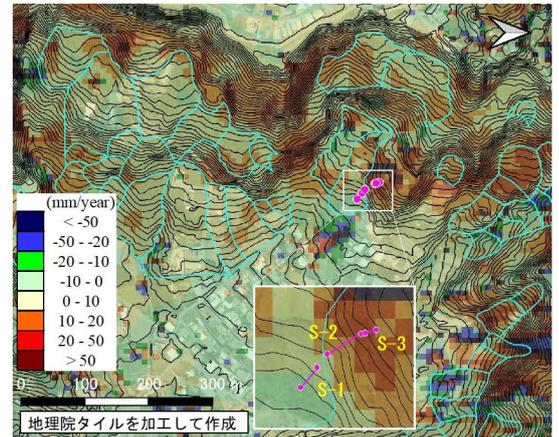


図-4 SAR 解析による斜面水平方向の変位速度分布

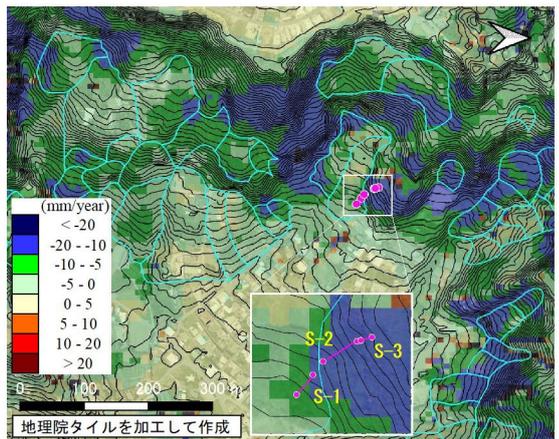


図-5 SAR 解析による上下方向の変位速度分布

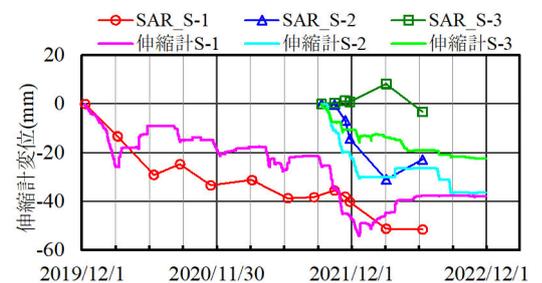


図-6 SAR 解析結果と伸縮計による実測値との比較