

衛星 SAR による広域地すべり地域からの不安定斜面の抽出と観測結果（その1）

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, 上野 明紘
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検討されているが, 植生の影響, 斜面の向きや勾配などの地形的影響, 様々なノイズによる計測精度の低下など実用化に向けての課題がある. 広範囲を面的にモニタリングするためには, 局所的な変動の有無や程度を現地調査し, 個別箇所に計測機器を設置することは経済的な負荷が大きい. そこで, 衛星 SAR データを活用して点検が必要な箇所の抽出や, 点検優先度のスクリーニングが可能になれば, 経済的かつ効率的に管理が行えるようになる.

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(延長約 10km)を対象に, 衛星 SAR データを用いた時系列干渉 SAR 解析結果をもとに大きな変位が生じているであろう斜面が分布する 3 地区を抽出した. 抽出した地区に合計 32 個の地表傾斜計を設置して降雨時期の地表変状を観測し, その観測結果より SAR 解析による地すべり箇所抽出方法の妥当性を検証した. 本報告では, そのうちの抽出方法と地表傾斜計の設置について示す.

2. 対象地点の概要

対象地点は, 図-1 に示す沖縄本島の南部に位置する中城湾周辺の斜面であり, 比高差約 100m の段丘地形が海岸線とほぼ平行に 10km 連続している. この地域は, ほぼ全域にわたって島尻泥岩が分布し, 風化に対する抵抗力が非常に弱いため軟質・土壌化しやすいため, 地形判読によると水色の線で示すように多数の地すべりブロックが分布している. なお, 地すべりのすべり面は, 表層から概ね 10~20m 以浅で発生している.

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. 算定される変位は, 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, 図-2 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 を次式により算定した.

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

$$V = (LOS_a - H \cdot \cos(90 + \delta_d - \theta) \cdot \sin \phi_a) / \sin \phi_a \quad (2)$$

ここで, LOS は LOS 変位, θ は斜面方向であり水平変位 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. なお, 斜面方向は斜面最急勾配方向とし, 国土地理院の 5mDEM データをもとに算定した.

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 $10m \times 10m$ とした.

4. 計測対象斜面の抽出

変位の大きい斜面の抽出に当たっては, LOS 変位の時系列データはばらつきが大きいと年平均 LOS 変位速度により評価するとともに, 斜面方向の違いについても比較できるように, 図-1 に示す 3 地区を選定した. 熱田地区

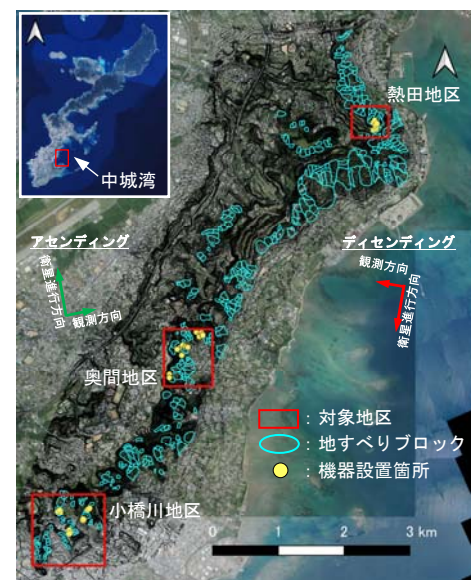
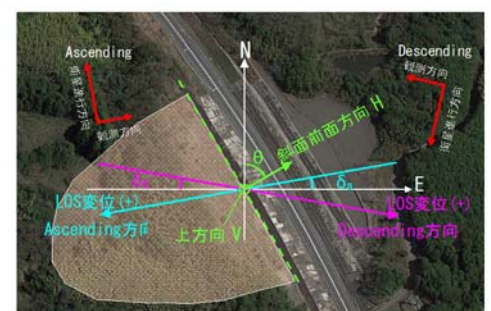


図-1 検討地区と傾斜計設置位置



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

図-2 斜面方向の変形ベクトル算定の概念図

は北～北東方向斜面が広く分布し、奥間地区は東～南東方向、小橋川地区は谷部を中心に東方向および西方向斜面が広く分布している。図-3 は各地区の時系列 SAR 解析による地形の最急勾配方向の水平および鉛直変位速度分布を示す。水平変位速度は斜面前方方向をプラス、鉛直変位速度は鉛直上向き方向をプラスとする。斜面の水平変位がプラスの箇所は、概ね鉛直変位がマイナスとなっており、斜面傾斜方向に沿った挙動を評価できている。熱田地区では、水色で囲った地すべりブロック内の変位が大きくなっており、地すべりブロックの移動が確認できる。一方、奥間地区では、地すべりブロックの変位は小さく、その背後の滑落崖の変位が大きくなっている。また、同一ブロックでも、内部では変位量に差が見られ、部分的な崩壊を伴うなどブロックの複雑な動きも推察できる。

図-3 は奥間地区の着目点の SAR による変位時系列を示す。数 10mm 程度のばらつきはあるものの、いずれの点も鉛直変位は継続的に沈下傾向を示し、水平変位も変位速度（時系列変位の勾配）に大小はあるが継続的な変位が生じている。なお、図-3(a)の水平変位は、Ok-2 で非常に大きく、Ok-1 では非常に小さい。しかし、Ok-2 は緩斜面、Ok-1 は急斜面の点であり、斜面勾配の影響が含まれるため、水平変位は地すべりの滑動量と必ずしも対応したものではない。

5. 地表傾斜計測機器の設置

抽出した 3 地区の変位の大きい斜面に 3 軸方向の地表傾斜計（OKIPPA、西松建設）を図-3 に示す 32 カ所に設置した。傾斜計の計測精度は 0.1° で、省電力広域無線通信（LPWA/Sigfox）を利用して 1 時間毎に計測結果をクラウドに送信することで、リアルタイムに計測結果を見ることができる。なお、電源は内蔵した電池のみで、約 2 年間にわたり電池交換の必要はない。設置にあたっては、単管を斜面に 50cm ほど打設して、斜面最急勾配法とそれに直交する方向の傾斜を計測できるように固定した。計測期間は 2023 年 4 月 20 日～2023 年 10 月 20 日までの 6 ヶ月間で、梅雨時期や秋雨時期の降雨による地すべり挙動を計測した。

6. おわりに

SAR 解析で変位が大きい箇所を現地で確認すると、地すべりブロックに小規模な滑落崖やクラックが存在するなど概ね整合した結果となっていた。なお、傾斜計の設置位置は、SAR 解析結果を参考にして最終的に現地状況を確認し決定した。

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る。また本研究の実施にあたり、ご協力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。

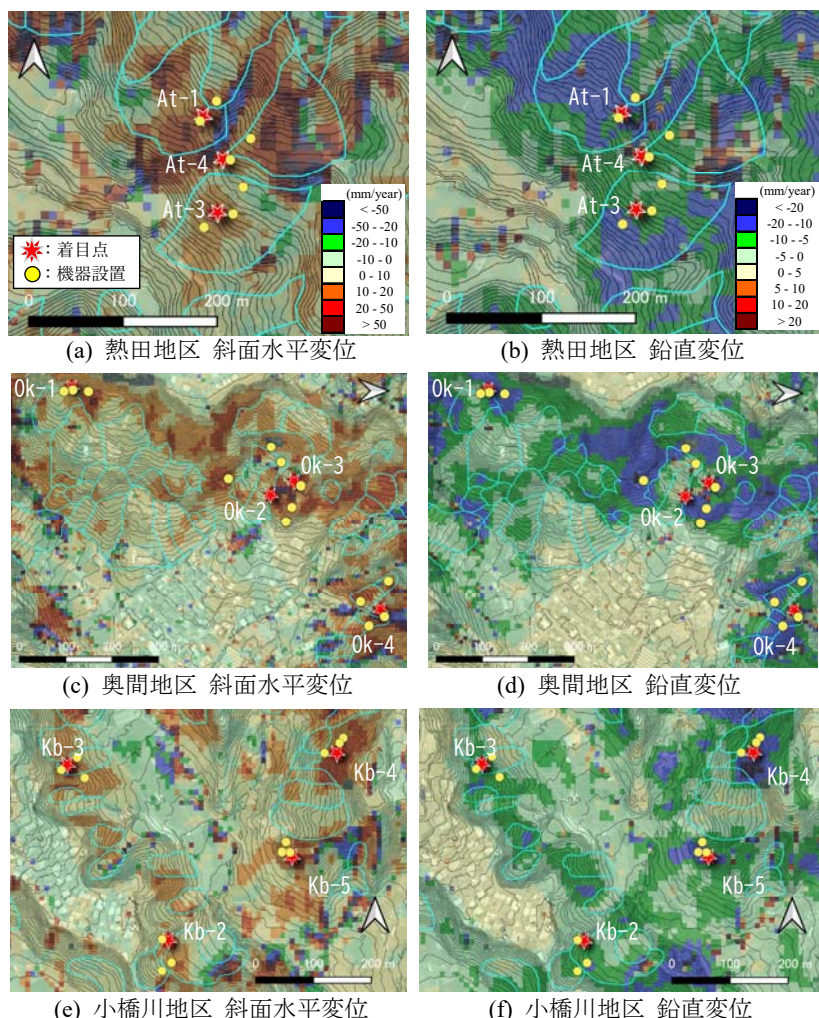


図-3 SAR 解析による斜面水平方向の変位速度分布

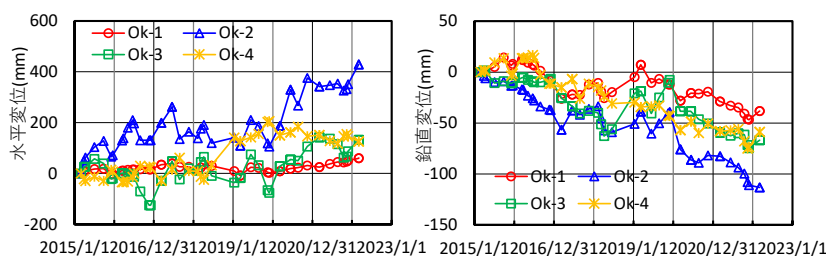


図-4 奥間地区の着目点の SAR による変位時系列



図-5 地表傾斜計の設置状況