

比較的狭い領域内の斜面変位計測への DInSAR の適用

山口大学大学院 学生会員 ○永崎 寛太 I Nyoman Sudi Parwata Putu Edi Yastika
山口大学大学院 正会員 中島 伸一郎 清水 則一

1. はじめに

地表面変位の連続計測は、地盤の安定評価や挙動予測において重要である。変位計測は、必要な精度で必要な範囲を連続的に低コストで目的にかなった精度で経済的に実施することが求められている。これまでの地表面変位計測には、伸縮計や傾斜計、光波測距儀、GNSSなどが用いられてきたが、広範囲の変位分布を求めることは容易ではない。そこで、合成開口レーダ（SAR：Synthetic Aperture Rader）^{1),2)}による DInSAR の利用が期待されている³⁾。筆者らはこれまで、広域地盤沈下や地すべり地帯の変位観測に DInSAR を適用している^{4),5)}。本研究では、DInSAR の対象としては比較的狭い数 km²程度の領域内の急傾斜斜面に対する DInSAR の適用性を調べる。

2. DInSAR 解析手順

2. 1. DInSAR とは

DInSAR とは、Differential Interferometry SAR のことで SAR データを使い、地表面（あるいは地表構造物）の変位を観測する手法である（図-1）。DInSAR で得られる地表面変位は、マイクロ波照射方向（LOS）の変位である。DInSAR で観測された位相差は、以下の式で表される³⁾。

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{disp} + \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_{orb} + \Delta\varphi_{atm} + \Delta\varphi_{scatt} + \Delta\varphi_{noise} \quad (1)$$

$\Delta\varphi$ が実際に観測される位相差で、様々な要因によって生じる位相差が含まれている。ここで、 $\Delta\varphi_{topo}$ は地形高低差に起因する誤差、 $\Delta\varphi_{orb}$ は SAR 衛星軌道による誤差、 $\Delta\varphi_{atm}$ 、 $\Delta\varphi_{scatt}$ 、および、 $\Delta\varphi_{noise}$ は、マイクロ波の大気圏遅延、散乱要因、および、ランダムノイズに基づく誤差である。この中から、地表面変位によって生じる位相差 $\Delta\varphi_{disp}$ を取り出し、LOS 変位を算出するのが DInSAR の流れである。

2. 2. DInSAR 解析手順

図-2 に DInSAR 解析の流れを示す。まず干渉画像を作成後、2 時期の衛星位置が異なることに起因して地表に生じる干渉位相を除去する。次に、地表の標高の変化によって生じる干渉位相を数値標高モデル（DEM）によって取り除き、式（1）の変位に基づく位相差 $\Delta\varphi_{disp}$ を算出し、位相アンラッピングを行う。位相アンラッピングとは、0 から 2π の間の値として観測された位相がある基準位置から積算して変位を求める処理である。その後、数点の GCP（Ground control points：変位が 0 と考えられる点）を指定し、得られた変位分布の系統的な誤差や画像のゆがみを補正する。この操作をリフラットニングという。最後に、変位 $d_{LOS} = (4\pi/\lambda)\Delta\varphi_{disp}$ に変換し、さらに、ジオコーディングにより、衛星座標系（アジマス-レンジ）で表示されていた結果を地理座標系に変換し、最終結果を得る。

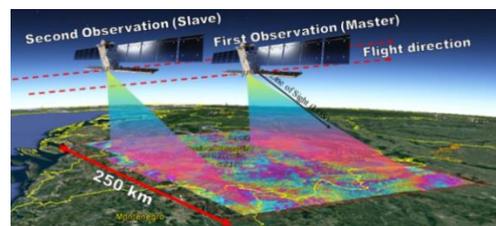


図-1 DInSAR のイメージ

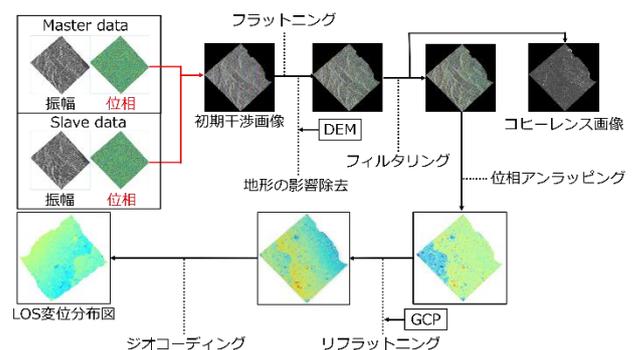


図-2 DInSAR 解析手順

キーワード DInSAR, 変位モニタリング, 急傾斜斜面

連絡先 〒755-0097 宇部市常盤台 2-16-1 山口大学工学部社会建設工学科

TEL(0836)85-9334

本研究では時系列解析手法の1つである SBAS (Small Baseline Subset) 法⁶⁾を用いる。この手法は、多数の SAR 画像から衛星間距離の短い干渉ペアを構成し、それぞれのペアについて DInSAR を適用し、干渉性の高いピクセルに対して時系列モデルを仮定して、変位の時間推移を推定する。DInSAR 解析では、式 (1) で示した $\Delta\phi_{\text{topo}}$ や $\Delta\phi_{\text{atm}}$, $\Delta\phi_{\text{scatt}}$ 等の誤差が計測精度に影響を及ぼすが、SBAS 法を用いることで、これらの誤差の一部が低減され、計測精度を向上させるといわれている⁶⁾。

3. 適用対象

3.1 現場斜面について

本研究で対象とする現場は、国道沿いの急傾斜斜面である。過去に落石、土砂流出、崩壊等の災害を過去に多く経験している。地質構成は中生代白亜紀後期の流紋岩類に花崗岩類が貫入し基盤が形成され、表面は堆積土に覆われている。安全監視のため5箇所でGPSによる三次元変位計測 (G-2~G-6) が行われている。斜面全体が不安定で不動点を確保することが困難なこと、また、斜面ふもとの道路の斜面反対側は海であり、地形的制限から、基準点 K-1 は斜面ふもとの洞門上面に設置している⁷⁾。図-3 に対象斜面遠景と上空写真を示す。

3.2 SAR データの取得

SBAS-DInSAR 解析を行うために、ALOS-2 PALSAR-2 の Ascending (北向軌道) の 12 枚の SAR データを用いた。表-1 に SAR データ取得日、図-4 に SBAS-DInSAR 解析で定めた干渉ペアの接続グラフを示す。

3.3 解析範囲

解析範囲は現場斜面を含んだ 4km×3.7km 四方である。図-5 に解析範囲を示す。白色で囲んだ範囲が解析範囲、橙色で囲んだ範囲が GPS による三次元変位計測が行われている対象斜面周辺である。

4. 解析結果

4.1 SBAS-DInSAR による LOS 変位分布図

図-6、図-7 に DInSAR-SBAS 解析を行った結果の LOS 変位分布図の一部を示す。分解能セル (解像度) は 10m×10m である。図-6 は、解析範囲全体を示した広域的な LOS 変位分布図である。標高の高い領域で、地形の高低差の影響を受けているように見える。DEM の誤差や対流圏遅延の影響以外にも、急傾斜の影響もあると考えられる。

図-7 は、対象斜面周辺領域の LOS 変位分布図である。対象斜面の GPS 計測点周辺では、徐々に変位が増加している様子がうかがえる。一方、対象斜面周辺において、現在安定していると思われる箇所、たとえば、対象斜面南西においても変位が生じているように見える。そのような領域では干渉性 (干渉の明確さ) が低いことが原因であると推測される。



(a) 対象斜面遠景 (b) 上空写真
図-3 対象とする国道沿いの道路斜面

表-1 データ取得日

No	Data	No	Data	No	Data
1	2014-11-6	5	2016-3-24	9	2017-6-15
2	2015-4-9	6	2016-6-30	10	2018-4-5
3	2015-7-2	7	2016-12-1	11	2019-3-7
4	2015-12-17	8	2017-3-9	12	2019-6-13

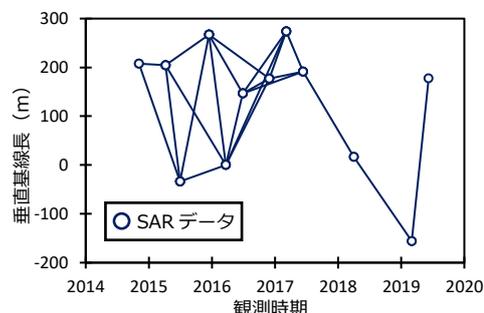


図-4 干渉ペアの接続グラフ

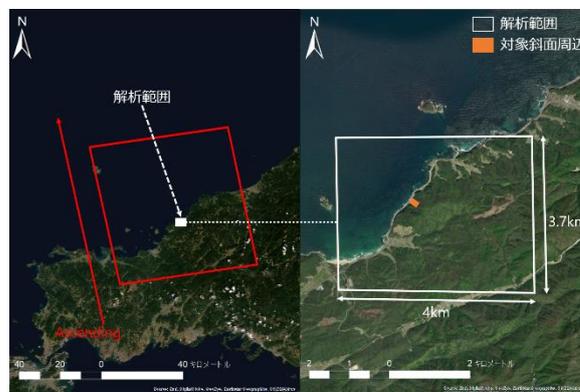
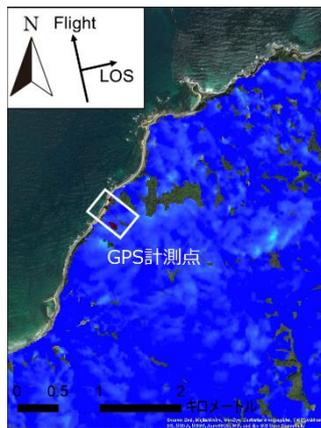


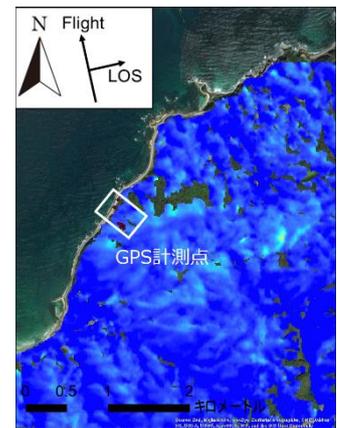
図-5 解析範囲



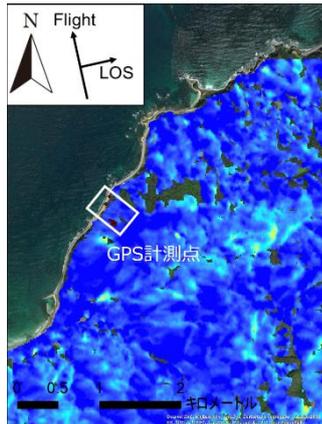
(a) 変位分布領域



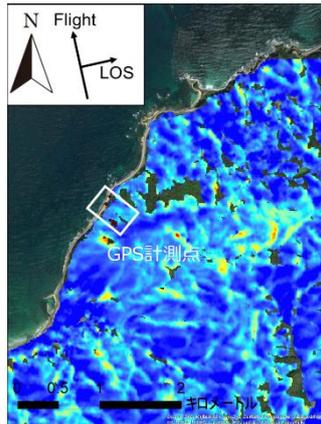
(b) 2016/03/24



(c) 2017/03/09



(d) 2018/04/05



(e) 2019/06/13

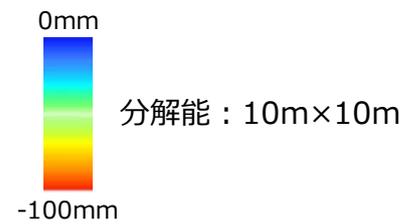
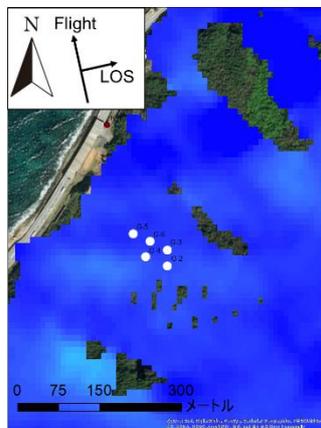


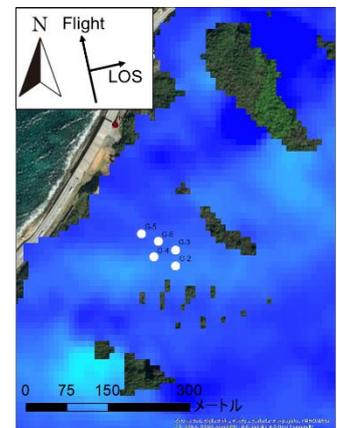
図-6 広域的な LOS 変位分布図



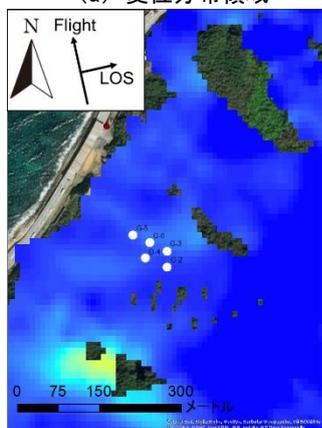
(a) 変位分布領域



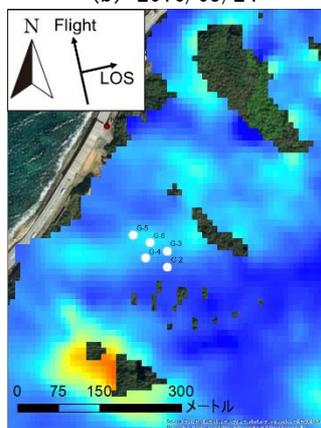
(b) 2016/03/24



(c) 2017/03/09



(d) 2018/04/05



(e) 2019/06/13



図-7 対象斜面周辺領域の LOS 変位分布図

4. 2. SBAS-DInSAR による変位計測と GPS 変位計測の時系列推移

GPS 計測点 (G-2~G-4) における SBAS-DInSAR による変位 (GPS 計測点を含むピクセルの変位) の時間推移を図-8 に示す。マイナスの LOS 変位は LOS 方向に沿う伸びを表す。GPS による変位計測も併せて示している。GPS 変位計測では、三次元方向の変位を計測しているため LOS 方向に変換している。計測位置 G-3, G-4 については、DInSAR と GPS による両者の計測結果の差は、概ね 10mm 以内で、時間推移も良い一致を示している。一方、G-2 では GPS 計測結果は徐々に LOS 変位量が増加しているのに対して、DInSAR 計測結果は 2017 年以降変位速度が減少し、両者の差は最大で 20mm 程度となっている。図-4 から明らかなように、2017 年以降の干渉ペアが少なく、このことが原因の一つと考えられる。

図-9 は DInSAR と GPS の LOS 変位量の比較である。この図からも両者は概ね良い一致を示していることが分かる。

5. おわりに

本研究では、比較的適用事例が少ない数 km² 程度の DInSAR としては小規模領域内の急傾斜斜面に対して DInSAR の適用性を調査した。広域的には誤差が生じていても、対象斜面においては比較的安定した解が得られた。また、GPS による計測結果と比較したところ、概ね 10mm 程度、一部では 20mm 程度の差で変位が求められた。比較的小規模な急傾斜斜面の変位計測に DInSAR を適用できる可能性が示された。一方、変位が生じていないと思われる個所にも変位が生じているように見えるため、常に信頼のおける結果を得るための工夫が必要と考えられる。

参考文献

- 1) 大内和夫. リモートセンシングのための合成開口レーダーの基礎[第2版], 東京電機大学出版局, 2009.
- 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, 2011.
- 3) A. Ferretti: Satellite InSAR Data: reservoir monitoring from space, EAGE, 2014.
- 4) Yastika, P. E., Shimizu, N. and Abidin, H.Z.: Monitoring of long-term land subsidence from 2003 to 2007 in coastal area of Semarang, Indonesia by SBAS DInSAR analyses using Envisat-ASAR, ALOS-PALSAR, and Sentinel-1A SAR data, *Advances in Space Research*, 63, pp. 1719-1736, 2019.
- 5) I. N. S. Parwata, N. Shimizu, B. Grujić, R. Čeliković, S. Zekan, and I. Vrkljan: Validity of SBAS-DInSAR Monitoring of Subsidence Induced by Salt Mining in Tuzla, *Proceedings of ISRM Specialized Conference "Geotechnical Challenges in Karst"*, Croatia, pp. 311-316, 2019.
- 6) Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. and Sansosti, E., A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms, *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 40, 2375-2383, 2002.
- 7) 中島 伸一郎, 古山 陽太, 林 佑一郎, Nguyen Trung Kiena, 清水 則一, 廣川 誠一: 急傾斜長大斜面の GPS 三次元変位計測における誤差補正の効果と長期連続モニタリング結果, *日本地すべり学会誌*, 55 巻, 第 1 号, pp.13-24, 2018.

謝辞

本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助 (16H03153) を受けて実施した。また、ALOS-2 のデータは日本宇宙航空研究開発機構 (JAXA) から提供いただいた。さらに、国土交通省中国地方整備局山口河川国道事務所には GPS に関する現場計測にご協力いただいた。関係各位に謝意を表す。

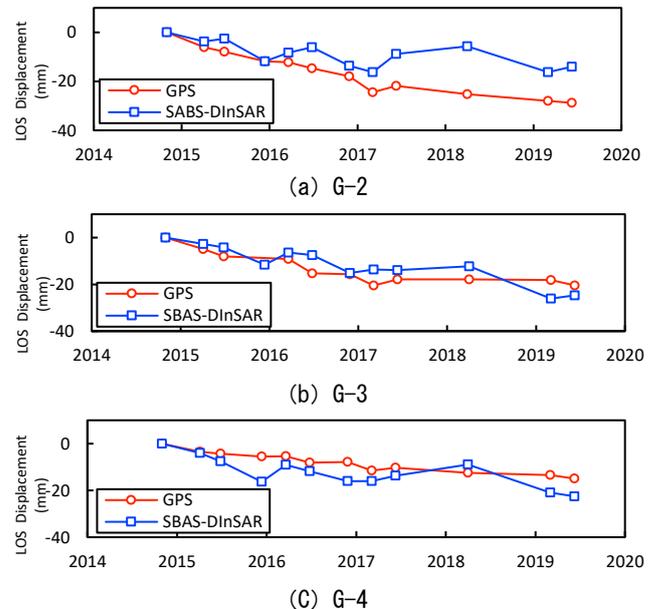


図-8 SBAS-DInSAR と GPS の時間推移

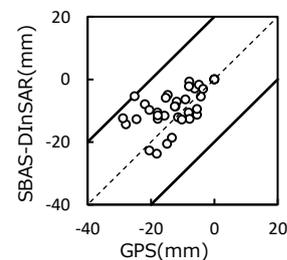


図-9 SBAS-DInSAR と GPS (G-2~G-4) の LOS 変位量の比較