# 道路沿いの急傾斜斜面の変位計測へのDInSAR の適用性について

久保 奨太郎1\*・永崎 寛太1・里 岳志1・中島 伸一郎1・清水 則一1

<sup>1</sup>山口大学大学院 創成科学研究科建設環境系専攻(〒755-8611山口県宇部市常盤台2-16-1) \*E-mail: b002vev@yamaguchi-u.ac.jp

Key Words : DInSAR, SBAS, monitoring, displacement, steep slope, coherence, data selection

# 1. はじめに

人工衛星に搭載された合成開口レーダ<sup>1)</sup>(SAR: Synthetic Aperture Rader)による観測データを用いる差分 干渉SAR<sup>2)</sup>(DInSAR: Differential Interferometry SAR)は, 地表にセンサを設置することなく,広範囲の地表面変位 分布を求めることができる方法として注目されている<sup>3)</sup>.

一方,計測結果は対象とする地表面の環境や地形の影響を受けるため,対象現場ごとに適切な解析と評価が必要であり,実務利用のための研究が一層望まれている.特に,土木分野では一般に計測対象領域は0.1~1km<sup>2</sup>程度の場合が多く,これまでDInSARが適用されてきた範囲と比べるとかなり狭く,また,急傾斜地も含まれ,このような条件でのSARの適用性については,まだ,十分に明らかではない.

筆者らは、道路沿いの急傾斜斜面<sup>4,9</sup>を対象に斜面の 安全監視へのSARの適用性について調査している<sup>9</sup>.本 報告では、SBAS-DInSAR<sup>7</sup>の解析条件や手順を検討し、 GPSによる変位計測結果との比較を行いSARによる変位 計測結果の妥当性について考察する.

## 2. DInSARについて

### (1) DInSARとは

DInSARは、観測対象となる領域に対して、SAR衛星 が異なる時期に観測したデータ(地表に照射されたマイ クロ波の反射波)を用いて、地表面変位を検出する方法 である<sup>9</sup>.

異なる2時期にSARで観測された位相差分 $\Delta \varphi$ は、次式 で示される<sup>3</sup>.

 $\Delta \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} d_{LOS} + \Delta \varphi_{topo} + \Delta \varphi_{orb} + \Delta \varphi_{atm} + \Delta \varphi_{scatt} + \Delta \varphi_{noise}$ (1)ここで、d<sub>LOS</sub>は地表面の変位で、SAR衛星と地表点を結 ぶマイクロ波(波長:λ)の照射方向(LOS: Line of Sight と呼ぶ)の距離の伸縮量を表す.これは、LOS方向の一 次元変位でLOS変位と呼ばれる(図-1).式(1)は, 実際に観測される位相差には、様々な要因によって生じ る誤差が含まれることを示している. Δφ<sub>topo</sub>は地形標 高の誤差に起因する位相差の誤差, Δφ<sub>orb</sub>はSAR衛星位 置の誤差に起因する位相差の誤差,また, $\Delta \varphi_{atm}$ ,  $\Delta \varphi_{scatt}$ ,および、 $\Delta \varphi_{noise}$ は、それぞれ、マイクロ波の 大気圏遅延、散乱、および、ランダムノイズに基づく位 相差の誤差である. DInSARはSARが観測した位相から 位相差分Δφを求め、その後、上記の誤差を排除して、 SAR衛星と地表点間の距離の変化(LOS変位)d<sub>LOS</sub>を求 める方法である".

## (2) 解析手順

DInSAR解析の手順の概要を図-2に示す.まず同一領 域における異なる時期のSARデータ(電波の反射波の強 度と位相)を取得する.DInSARでは位相を用いる.こ こで,位相差をとる基準のデータはMaster,変位を求め る時期のデータはSlaveと呼ばれる.

次に、MasterとSlaveのデータを用いて位相差を求め、 初期干渉画像を作成し、2時期の衛星位置が異なること によって地表に生じる干渉位相を除去する(フラットニ ングと呼ばれる). その後、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)を用いて除 去し、続いてフィルタリング処理によってノイズを低減 させ、式(1) 左辺の位相差分Δφを算出する.

さらに、0~2π間の値で求められている位相差分を基 準位置から積算し(位相アンラッピング), GCP (Ground Control Point:変位が0とみなされる参照点)を 設定して空間的な系統誤差,画像のゆがみを補正する (リフラットニング),最後に,アンラップした位相差 分から変位を求め,衛星座標系(アジマス-レンジ)を 地理座標系(緯度-経度)に変換(ジオコーディング) して,最終結果の変位分布を求める.

本研究では、時系列解析法の1つであるSBAS (Small Baseline Subset) 法<sup>7</sup>を用いる.この手法は、まず、多数 のSAR画像から、衛星間距離と観測時期間隔の最大値を 設定し、その値より短い距離、間隔の干渉ペアを選ぶ. 次に、それぞれのペアにDInSARを適用し、さらに、位 相の時間推移モデルを仮定し(本研究では線形モデル <sup>7</sup>)、そのモデルに基づき変位の時間推移を求める. DInSAR解析では、式(1)で示した $\Delta \varphi_{topo} \diamond \Delta \varphi_{atm}$ 、  $\Delta \varphi_{scatt}$ 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 精度が向上するといわれている<sup>2,7</sup>.

本研究では, ENVI SARScape (sarmap社)を用いて, SBAS-DInSAR解析を実施した.

# 3. 対象現場

#### (1) 現場概要

現場は、海岸の国道沿いに位置する急傾斜斜面(幅約 150m、長さ約250m、高低差約110m、平均斜度約30°) である(図-3).本現場では、過去に何度も斜面崩壊が 発生しており、長期にわたりGPS変位計測を実施してい る<sup>4,5</sup>.GPS変位計測は、斜面下の道路洞門上に基準点 (K1)を置き、斜面上部に3つの計測点(G2,G3,G4)を 設置して、2014年から毎時間隔で連続計測している.





図-3 対象斜面

#### (2) SAR データの適用

SBAS-DInSAR解析では, ALOS-2 PALSAR-2のデータを 用いる.本研究では, Ascending (北行軌道) と Descending (南行軌道) の両観測方向のデータを使用す るが,本論文では紙面の都合で, **表**-1に示すAscendingデ ータに対する結果のみについて述べる.

SBAS解析においては、1つのSARデータに対して干 渉ペアの数がある程度必要とされている.その影響を調 べるため、本研究では、1データ当たりの平均干渉ペア 数が4、および、8となるケース、すなわち、Ascendingの 場合では、干渉ペアの観測間隔が最大360日、および、 900日のケースを解析する.図-4に、それぞれのケース の干渉ペアの接続グラフを示す.

Ascending 軌道の SAR データの観察範囲は、図-5 の赤 枠で示され、SBAS-DInSAR 解析では本斜面を含む 3.7 km ×4.0 km の範囲(白枠)を切り出して実施した. なお、 オレンジ色の部分が対象斜面である.

					0
No.	Date	No.	Date	No.	Date
0	2014/11/6	6	2016/12/1	12	2019/11/28
1	2015/4/9	7	2017/3/9	13	2020/3/5
2	2015/7/2	8	2017/6/15	14	2020/6/11
3	2015/12/17	9	2018/4/5	15	2021/3/4
4	2016/3/24	10	2019/3/7		
5	2016/6/30	11	2019/6/13		

表-1 SA	Rデータ	レ観測日	(Ascending)
--------	------	------	-------------





(b) 最大干渉ペア観測間隔 900 日 (ケース 900A)

図-4 干渉ペアの接続グラフ(Ascending). 黄色:衛星間距離の基準となるデータ、緑色: SAR データ.



図-5 SARデータの範囲(赤枠)と解析範囲(白枠)

# 4. 解析結果

## (1) LOS 変位分布

図-6,および、図-7に、それぞれ、Ascendingデータによる干渉ペアの最大観測間隔が360日(ケース360A),および、900日(ケース900A)の条件(図-4参照)で解析して得られたLOS変位分布の推移を示す.変位分布は広域、および、対象斜面周辺に分けて示している.なお、変位の色が表示されていない個所は、干渉性が低く解が得られていないことによる.また、地表面のピクセルは10m×10mである.

まず、ケース360A(図-6)では、標高の高い山側の LOS変位分布の赤い領域が時間とともに広がり、マイナ ス(衛星地表間距離が伸びる)方向へ変位が増加してい る.山間部においては、現実的にこのような変位が生じ ているとは考えにくく、地形や植生の影響を受けた誤差 の可能性が高い.

一方、ケース900Aは、ケース360Aと比較して赤色の 領域が小さくなっている.一般に、干渉ペアの観測間隔 を大きく取ると地表や大気の条件が異なり、電波の干渉 性が低くなりよい解が得られないと考えられている.し かし、今回のようにSARのデータ数が少ないと、観測間 隔を短く取ると干渉ペア数も少なくなり(ケース360A では2018年4月5日のデータは2ペアのみ.図-4(a))、解 の変動の影響を受けやすくなり、結果として変位のばら つきも大きくなると思われる.ケース900Aでは,各デ ータの平均ペア数は8であり(ケース360Aの平均ペア数 は4,2018年4月5日では11.図-4(b)),このことが変動 の低減につながっている可能性がある.

(上の凡例は, 図-7, 10, 11に共通)



(b) 対象斜面周辺

図-6 最大観測間隔360日 (ケース360A) のLOS変位分布 (Ascending)





(b) 対象斜面周辺

図-7 最大観測間隔900日(ケース900A)のLOS変位分布 (Ascending)

## (2) 解の改善とコヒーレンスおよび最大観測間隔

コヒーレンスは干渉性(干渉のしやすさ)を表す指標 で、しばしば、DInSAR解析結果の良し悪しの評価に利 用される<sup>2</sup>. DInSAR解析では、対象とする位置(ピクセ ル)と周辺の反射波の位相の相関性を求め(値は0~1), 1に近いほど干渉性が高いと判断される<sup>2</sup>.

SBAS-DInSAR解析においては、図-8に示すように干渉 ペアごとにコヒーレンス分布が得られる.本研究では、 これらの画像から、各ピクセル毎にコヒーレンス値を平 均し、図-9(a)、(b)に示すような平均コヒーレンス分布 を求めた.同図から、赤色やオレンジ色の平均コヒーレ ンスが低い箇所は、図-6、および、図-7において、赤色 領域が広がっている領域に対応しているように見える.

ケース900Aではケース360Aと比べて、LOS変位の空間 的なばらつきは抑えられているが(図-6,図-7),平均 コヒーレンスについては小さい値の領域が広がった(図 -9(a),(b)).すなわち,最大観測間隔を大きく取ると 干渉ペア数は多くなり,解は改善される傾向にあるが, 観測期間を大きく取ったことにより干渉性は低下する. 干渉性が大きく低下せず,解が改善されるような適切な 最大観測間隔の設定法が今後の課題と考えられる.

次に、図-8において、ケース360Aのコヒーレンス分 布を詳細にみると、2015/12/17 (No.3)、および、 2020/6/11 (No.14)のデータを使った干渉ペアのコヒーレ ンスが低くなり、ケース900Aでは、2015/12/17 (No.3)、 2017/6/15 (No.8)、ならびに、2020/6/11 (No.14)を使う とコヒーレンスが低くなることが見いだせる。そこで、 干渉性が低くなるSARデータを除外しSBAS解析を行え ば、解が改善されることが期待される。





(b) 最大観測間隔900日(ケース900A)図-8 干渉ペアごとのコヒーレンス分布(Ascending)



図-9 平均コヒーレンス分布 (Ascending)

図-9(c),(d)に、ケース360A、および、ケース900Aに、 干渉性が低くなるSARデータを除外した場合の平均コヒ ーレンス分布を示す.図-9(a),(b)と比べ、図-9(c),(d) は、それぞれ、赤色とオレンジ色の領域が小さくなり、 黄色と緑色の領域が広がり、平均コヒーレンスが全般に 高くなり干渉性が改善されていることがわかる.すなわ ち、干渉性が低くなるSARデータを除外すると、全般に 干渉性が高くなる.

一方、図-10、および、図-11に、それぞれ、ケース 360A、および、ケース900Aにおいて、干渉性が低くな るデータを除外したSBAS解析によって得た変位分布の 時系列変化を示す.いずれのケースにおいても、図-6、 および、図-7と比べると、コヒーレンスが低く解が得ら れなかった領域が小さくなり改善はみられる.しかしな がら、山間部の変位分布にはほとんど変化はみられない. 対象斜面周辺についても同様である.つまり、干渉性は 改善されたが、変位分布については改善が十分でないよ うである.

解の改善に対して、コヒーレンス(干渉性)と最大観 測間隔の影響を調べたが、関係を明らかにするにはさら なる検討が必要である.



図-10 最大観測間隔360日 (ケース360A) のLOS変位分布 (デー タ No.3, No.14を除外) (Ascending)



(b) 対象斜面周辺

図-11 最大観測間隔900日 (ケース900A) のLOS変位分布 (デー タ No.3, No.8, No. 14を除外) (Ascending)

## (3) GPS変位計測結果との比較

SBAS-DInSAR解析による対象斜面の変位の時系列推移 の妥当性を評価するために、長期にわたるGPS変位計測 結果<sup>4,5</sup>と比較する.なお、GPS変位計測で得られる変位 は3次元であり、DInSARの結果と比較するため、LOS方 向の成分に変換する<sup>9</sup>.

図-12に、GPS計測点(G2,G3,G4)におけるSBAS-DInSAR,および、GPSのLOS変位の2014年からの時間推移を示す.SBAS-DInSARによるいずれの変位も、GPS計測結果の推移と同様の傾向を示している.図-13に両者の相関を示す.両者の差はおおむね10mm以内に収まっており、DInSAR解析としては良好な結果が得られた.

4 (1),(2)では、広域的な変位分布では、変位が生じていないと思われる山間部にも変位が生じているような結果が得られ、改善を試みたが、現時点では必ずしも納得できる結果とはならなかった.

一方,安全監視を行う対象斜面では、上に述べたように、GPSによる変位結果と概ね整合する妥当な結果を得ている.図-14に、対象斜面の平均コヒーレンス分布を示す.コヒーレンスは比較的良い値となっており、この領域のDInSARの結果の妥当性がうかがえる.

以上のように、広域的に解の信頼性が十分でない場合 であっても、干渉性が良好であれば、本研究の対象斜面 のような、DInSARとしては比較的狭い領域であっても、 5. まとめ 十分な適用性があるものと考えられる.



図-12 SBAS-DInSARとGPSのLOS変位の比較 (Ascending)





図-14 対象斜面の平均コヒーレンス分布 (Ascending)

本研究で得られた知見を以下に示す.

- 広域的な変位分布は山間部の地形や植生の影響を受ける.そのため、SARデータの数が十分でない SBAS による時系列解析では、干渉ペア数を増加させ変位分布を滑らかにするために、最大観測間隔を通常より大きく取ることは一つの方法である.ただし、観測間隔を大きく取ると干渉性が悪くなる傾向がある.適切な最大観測間隔の選び方は今後の課題である.
- ・本研究で対象とした道路沿いの急傾斜斜面では、比較的干渉性がよく、SBAS-DInSARによって得た変位は、GPS変位計測結果と10mm内の差でほぼ同様な時系列推移を示す.これは、ALOS-2データを用いた斜面の変位計測としては良好な結果であり、このような植生の多い急傾斜斜面でもDInSARでcmレベルの精度で計測可能である.

謝辞:本研究で用いたALOS-2-PALSAR-2のデータは日本宇宙航空研究開発機構(JAXA)と山口大学との協定に基づき提供いただいた.また、本研究で活用したGPS変位計測は、多くの方々にご協力をいただいている.関係者各位に感謝する.本田謙一氏(国際航業(株))にはSBAS解析の観測間隔について貴重な助言をいただいた.ここに記して謝意を表する.

## 参考文献

- 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) Ferretti. A: Satellite InSAR Data: reservoir monitoring from space, EAGE, 2014.
- 3) 清水則一:宇宙技術を利用した変位モニタリング,地 盤工学会誌, 69(1), pp.58-67, 2021.1.
- 4) 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.
- 5) 里岳志,中島伸一郎,清水則一:GPS による急傾斜斜 面の3次元変位の長期連続計測,第15回岩の力学国内 シンポジウム講演集,pp.59-64,2021.1.
- 永崎寛太,亀山光雄, I Nyoman Sudi Parawata, Putu Edi Yastika,清水則一,中島伸一郎:急傾斜斜面の変位監 視への時系列 DInSAR の適用について,第15回岩の力 学国内シンポジウム 講演集, pp.65-70, 2021.1.
- 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(11):2375–2383, 2002.