

衛星 SAR 差分干渉による地表変位監視

(株)地球科学総合研究所 大沼 巧

1. はじめに

衛星搭載合成開口レーダ(SAR)データの差分干渉解析(Differential Interferometry SAR; DInSAR)により、地表変位量を高精度・高頻度に把握することが可能である。SAR センサは、地表に向けマイクロ波を照射し、数十 km～数百 km 四方の範囲を1m～15m/画素程度の分解能で観測し、地表物による散乱強度と位相を記録する。2時期の SAR データの位相差は、観測間に生じた地表変位量を反映する。差分干渉解析は、この変位量をマイクロ波の波長のオーダーで検出する技術である。一般に用いられるマイクロ波の波長は約3cm (Xバンド)、6cm (Cバンド) および24cm (Lバンド) であり、変位量の検出分解能は波長の1/10～1/20とされる。最近では時間分解能(観測頻度)が向上し、12日間隔で観測された SAR データが利用可能である。本発表では、波長3cmの衛星 SAR データによる、香川県～徳島県の一部に関する2014年以降の地表変位監視の例を紹介する。

2. 衛星 SAR 差分干渉

(1) 原理

SAR センサはマイクロ波を地表に向け照射し、地表物による散乱強度と位相を記録する。位相は、衛星—地表間の距離をマイクロ波の波長で除した余りであり、 $-\pi \sim \pi$ の値を取る。1時期の観測データの位相はランダムに分布するが、観測時期と衛星位置が異なる別のデータとの位相差は空間で連続し、衛星—地表間の距離変化を反映する干渉縞となって画像上に現れる。干渉縞は、2時期の観測の軌道が異なることによる軌道縞、比高差による地形縞、観測間に生じた変位による変動縞、水蒸気遅延等の位相差による縞などから成るが、差分干渉は変動縞に注目しそれ以外の成分を除去して、SAR 波長のオーダーで地表変位量を求めようとする手法である。

(2) 使用データと処理

使用したデータは、欧州宇宙機構の衛星 Sentinel-1 の C バンド SAR データである。Sentinel-1 は、TOPS (Terrain Observation with Progressive Scans) という方式でデータを観測する Interferometric Wide Swath (IW) モードが標準の観測モードとなっている。TOPS はいわゆる ScanSAR の1方式である。一般的な衛星 SAR データの観測方式は Strip Map (SM) モードと呼ばれ、SAR 照射範囲の全ての散乱データを記録する。これに対して ScanSAR では照射方向のビームポジションを電氣的に切り替えることにより、より広い範囲のデータを取得する。しかしながら SM モードと同じ観測ではデータ量が膨大となるため、飛行方向にデータを間引くバーストモードという観

測方式が採られる。一般の ScanSAR では飛行方向のビームはスキャンされないが、TOPS 方式では飛行方向にもビームをスキャンし、地表は同一のアンテナパターンで照射されることになり、ほぼ一定の S/N 比のデータが得られる¹⁾。データを間引くため SM モードに比べて空間分解能は劣るが、Sentinel-1 CSAR IW モードの公称空間分解能は、照射方向5m、飛行方向20mである。

SM モードの干渉 SAR 処理では、2時期の画像間における画素のマッチング精度は一般に0.2画素未満とされるが、TOPS 方式では1/1,000画素未満という高い精度が求められる。これは TOPS 方式で飛行方向にアンテナを掃過するため、ドップラー中心周波数にバースト内で変化が生じ、僅かな画素の位置ずれが飛行方向の位相変化に大きく影響することによる。またバースト内のドップラー周波数の変化は干渉処理の際に除去されるべきであり、Deramping²⁾と称される処理を施す。これらの処理を経て、通常の SM モードと同様の干渉処理が適用可能となる。

3. 香川県～徳島県の一部の地表変位監視

(1) 地盤変位速度

2015年11月～2018年2月までに観測された10時期の Sentinel-1 CSAR データを用いて、観測間隔が半年程度以上の28組の干渉ペアに対して差分干渉処理を実施した。基線長再推定、位相アンラップ、鉛直変位量への変換を経て、スタッキング処理を施し、平均変位速度を求めた(図-1)。この処理は変位の傾向を把握することを目的としており、各ペアに対する水蒸気遅延の低減処理は施していない。図-1の変位速度の単位は cm/年である。図から判るように、高松市の福岡町・松福町周辺に1cm/年程度の隆起が、徳島阿波おどり空港の滑走路の沿岸部や東沖洲、阿南市などで-1cm/年を超える沈下が、それぞれ認められた。また徳島市付近の拡大図からは、徳島自動車道に沿って沈下を示す寒色系の色調が認められた。これに関して、水蒸気遅延の影響を低減しつつ詳細な時系列変位履歴を調査するために、Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR) 処理を適用した。その結果を次に示す。

(2) PSInSAR 処理による時系列変位履歴の解析

いわゆる PSInSAR 処理は、全方位に等しく強い散乱を返す画素 (Persistent Scatterer) や、時間軸でコヒーレントな画素に処理対象を限定し、位相変化に着目して画素単位で時間・空間で重回帰分析を行う処理である。一般に、PSInSAR 処理では対象の画素を限定するため、解析結果が得られる画素の分布は離散的となり、図-1に見られるような面的な解析結果は得られない。この点をカバ

一するために、通常 DInSAR 処理で行われるマルチルック化（複数画素の平均化）を PSInSAR 処理に取り入れ、空間分解能を犠牲にする代わりに位相精度を向上させ、コヒーレントな画素を増やすべく試みた。PSInSAR 処理には、2014年11月～2018年5月の12日間隔の74シーンから、12日、24日、36日間隔で連続する216ペアを用いた。図-2に処理結果を示す。色付き画素が PSInSAR 処理の結果が得られた画素であり、背景の白黒強度画像の部分は処理対象から除外された画素である。水蒸気遅延の影響を低減した結果、徳島阿波おどり空港の滑走路の沿岸部（図-2左上 D）と、徳島自動車道に沿う部分（図-2左上 A～C）の地表変位が顕著であることが判明した。徳島自動車道に沿う3地点（図-2右上、中左、中右のクロスヘア）で変位履歴を調査した結果、図-2下の時系列プロファイルに示すように、約3.5年の間にそれぞれ-7cm、-16cm、-11cm 程度の沈下が生じたものと推定された。また処理結果は、各地点が一定速度で沈下したのではなく、場所によって非線形形の沈下履歴となっていることを示している。これらの地点以外にも色付き画素が徳島自動車道に沿って分布するが、これらは自動車道の盛土部分やインターチェンジに対応することが判明した。即ち、Sentinel-1 CSAR データの DInSAR/PSInSAR 解析により、現地測量を必要とせず、盛土部分の沈下の監視が可能であると言える。

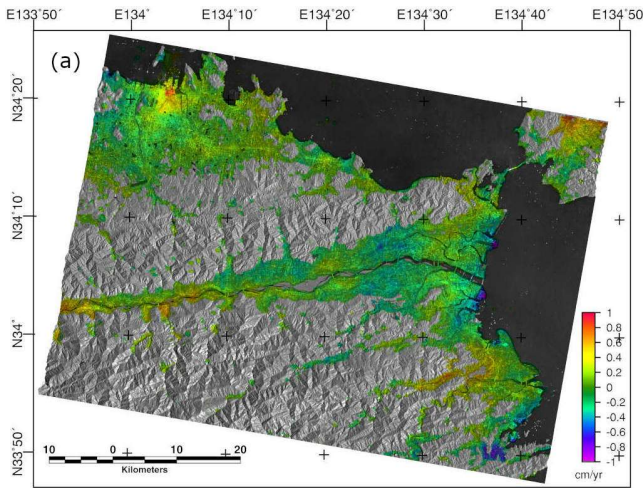


図-1 (a)Sentinel-1 CSAR の DInSAR 解析による2015年11月～2018年2月の香川県～徳島県周辺の地盤変位速度図、(b)高松市の拡大図、(c)徳島市の拡大図。

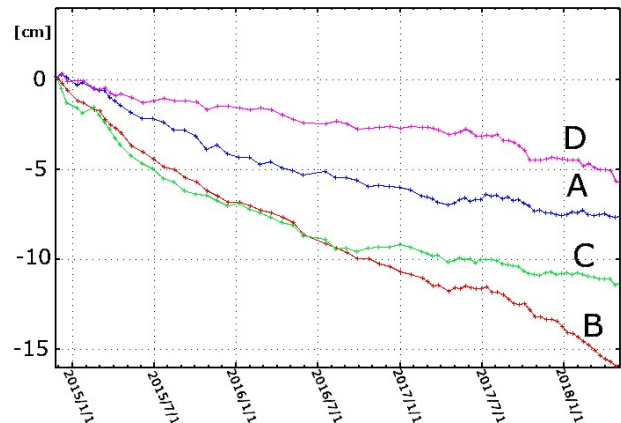
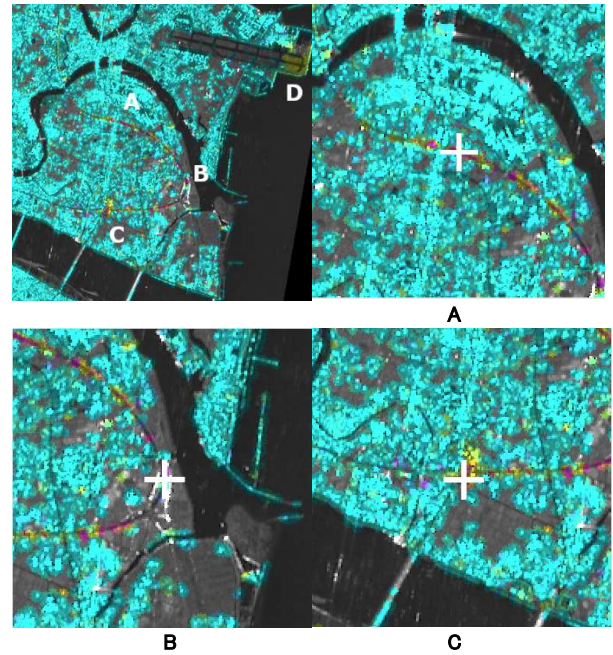


図-2 PSInSAR 処理による2014年11月～2018年5月の徳島市周辺の地表変位速度図(左上)とA～C地域の拡大図および時系列変位履歴。

4. おわりに

観測間隔が半年以上の30ペア程度のスタッキング処理により、広域の変位状況を cm オーダーで把握でき、多くのペアを用いる PSInSAR 解析で変位履歴を詳細に解析できることを示した。DInSAR/PSInSAR 解析は、短期間に地表変位状況を把握するための、極めて有効な手法である。加えて Sentinel-1 のデータは無償であり、2030年まで運用が保証されており、継続調査を低コストで行える。

《引用・参考文献》

- 1) De Zan, F., and Guarnieri, A.M., 2006, TOPSAR : Terrain Observation by Progressive Scans, Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions, v. 44, n.9, pp. 2,352-2,360.
- 2) European Space Agency, 2015, Definition of the TOPS SLC deramping function for products generated by the S-1 IPF, Technical Notes, Issue 1, Rev. 2, COPE-GSEG-EOPG-TN-14-0025, 15pp.