

衛星搭載合成開口レーダーSARによる インフラヘルスマonitoring

たけうち わたる
竹内 渉*

Key Word

地盤変動, DInSAR, PALSAR-2, GNSS, ARL

1 はじめに

我が国では、インフラの高齢化が進む中で、厳しい財政状況や熟練技術者の減少という状況にあり、予防保全によるインフラヘルスマonitoringが重要とされている。特に世界最先端のICRT（ICT（Information and Communication Technology）＋IRT（Information and Robot Technology））を活用した技術は、従来のインフラ維持管理市場に新たなビジネスチャンスを生むと共に、同様な課題に向き合うアジア諸国へのビジネス展開の可能性を生む。衛星放送、カーナビゲーション、リモートセンシング、全球即位衛星システム（GNSS）などに代表される、宇宙開発技術を利用したさまざまなサービスは、高度情報インフラ（GII）として既に我々の生活の一部となっているが、特に、リモートセンシング分野は、地球規模で顕在化しているさまざまな環境問題の監視・管理手段のみならず、災害監視、農林水産業、都市計画、地図作成等への実利用拡大が急速に進んでいる。

本稿では、リモートセンシング技術のうち、近年特にデータ入手性・技術開発が著しい衛星搭載型の合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar, SAR）に着目し、地盤変動の観測原理、社会インフラへの観測技術の活用推進に関する技術開発と実用例を紹介する。

2 合成開口レーダー（SAR）による 地表面変動の観測

2-1. 干渉 SAR 処理の観測原理

合成開口レーダー（SAR）は、衛星が軌道を移動しながらマイクロ波を地表に照射し、同じ地点を複

数回観測することにより、見かけ上大きなアンテナを持っていることと等しい画像を得る技術のことである¹⁾。マイクロ波は、雲や雨を透過するため、曇っていても地表を観測することができる。また、センサからマイクロ波を能動的に発射し、その後方散乱を観測しているため、昼夜を問わず観測が可能である。また、SARは、後方散乱と共に、衛星から地表までの距離を示す位相を取得でき、2つの画像から干渉SAR（Interferometry SAR, InSAR）解析を行うことで、地盤変動を計測することができる。

2-2. 干渉 SAR 処理の流れ

図1に示すように、干渉SAR処理の流れは大きく4つに分類される。

現在の技術では、衛星は高度な制御により軌道をコントロールされているものの、実際にはおよそ8km/sの高速で地球を周回するため、全く同一地点を通過するということはほぼなく、軌道のずれである垂直基線長 B_{perp} がなるべく短いデータを選択することが望ましい。PALSAR2を搭載したJAXAの衛星ALOS2は、非常に高い精度で軌道の調整を行っているため基線長は500m以下に抑えられており、どの画像の組合せでも高い干渉性が得やすくInSAR解析を行うことができる。

観測された衛星データには、大気中の水蒸気の影響などによるノイズを含む可能性があることから、算出した複数の地盤高の差を重ね合わせることで、ノイズ等の誤差の低減を図る。これをスタッキング処理と呼ぶ。スタッキング解析にあたり、InSAR解析結果を目視で確認したり、GNSSや水準測量の結果と比較し、ノイズの多い干渉ペアの画像を除外したりすることで、スタッキング解析結果の精度を向

*東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門 准教授



図1 干渉 SAR 処理の流れ

上させることができる。

レーダーは斜め方向から観測を行うため、地盤の変動量に変換するためには、衛星の観測角度の情報を加味する必要がある。図2に示すように、異なる二つの衛星の北行と南行の軌道から得られる視差方向の変動量から鉛直方向成分を得ることにより、地盤変動を抽出することができる。これを2.5次元解析と呼ぶ。

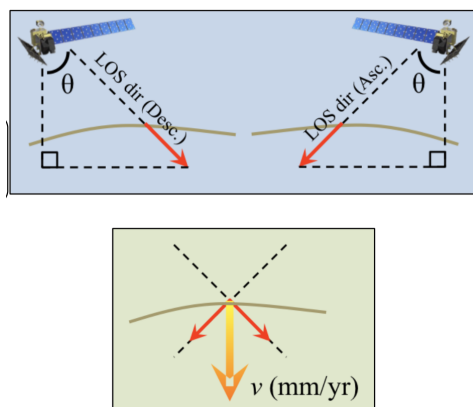


図2 異なる二つの視差方向の変動量から鉛直方向成分を地盤変動として抽出する2.5次元解析

2-3. 代表的な DInSAR 処理手法

2 画像の取得の間に、地震などの地殻変動があると、干渉画像から地形情報 (DEM) を差し引くことで、地盤変動を数 mm の精度で計測することができる。これは Differential InSAR (DInSAR) と呼ばれており、InSAR と DInSAR は実用されており、ほとんど確立した技術であると言える。代表的な DInSAR 手法には、Permanent Scatterers Interferometric Synthetic Aperture Radar (PSInSAR)、Small-Baseline Subset (SBAS) があり、またそれらを組み合わせた手法が多く用いられている。

PS-InSAR とは、ビルなど反射の位相が非常に安定なターゲットである恒久散乱体を含む画素の値のみを用いて SAR 干渉処理を行うもので、1) データ量を減らすことができる、2) 数十枚の時系列画像同時に使用して位相モデルに当てはめ、DEM の補正量や地表の変形量などを同時に推定できる、3) 画素ごとに時系列の地盤変動量の推定が可能であること、が大きな特徴である。SBAS とは、多数の SAR 画像から垂直基線長および時間間隔の短い干渉ペアを選択して干渉処理を行い、干渉性の高い画素を抽出して時間変化を検出する手法のことである。

これら DInSAR を実施するためのソフトウェアは、様々なものが手に入るようになってきているが²⁾、ほとんどが商用であり、現状で 1 ライセンスで最低でも 300 万円ほどする。

3 地盤沈下モニタリングへの適用例

3-1. 横浜市・根岸埠頭の港湾設備

図3は、東日本大震災前後の、横浜市・根岸埠頭の地盤沈下を DInSAR 解析で分析した結果である。画像は Terra SAR-X の高分解能モードの 5km 四方の微小変動量を解析したもので、観測期間は 2010 年 11 月から 2012 年 9 月となっている³⁾。画像の赤丸が、経年微小変化の大きい箇所を抽出したもので、海岸付近に大きな変動が確認できる。

衛星 SAR 画像には、X バンド (3cm)、C バンド (6cm)、L バンド (24cm) の主に 3 つの波長分解能があり、Terra SAR-X は波長分解能 3cm の X バンドレーダーである。波長分解能が高いほど高精度に地盤変動成分を検出できるが、波長分解能より大きい変動成分が検出された場合の解釈が難しくなること、波長分解能が相対的に高い X、C バンドでは、雲の影響を受けやすくなることが知られている。

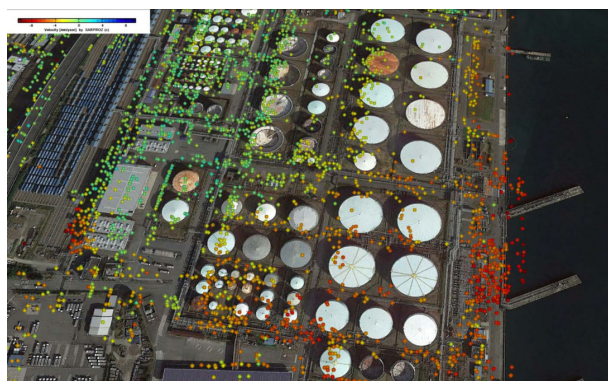


図3 Terra SAR-Xを用いた横浜市・根岸埠頭の地盤沈下DInSAR解析結果

3-2. インドネシア・スラバヤ市の地盤沈下

図4は、インドネシア・スラバヤ市街の広域地盤沈下をDInSAR解析で分析した結果である。画像はALOS-2の高分解能モードの60km四方の微小変動量を解析したもので、観測期間は2015年7月から2017年9月となっている⁴⁾。ALOS-2は波長分解能24cmのLバンドレーダーPALSAR2を搭載している。Lバンドは、森林で相対的に高い透過性があることが知られており、日本が世界をリードする宇宙技術の一つである。

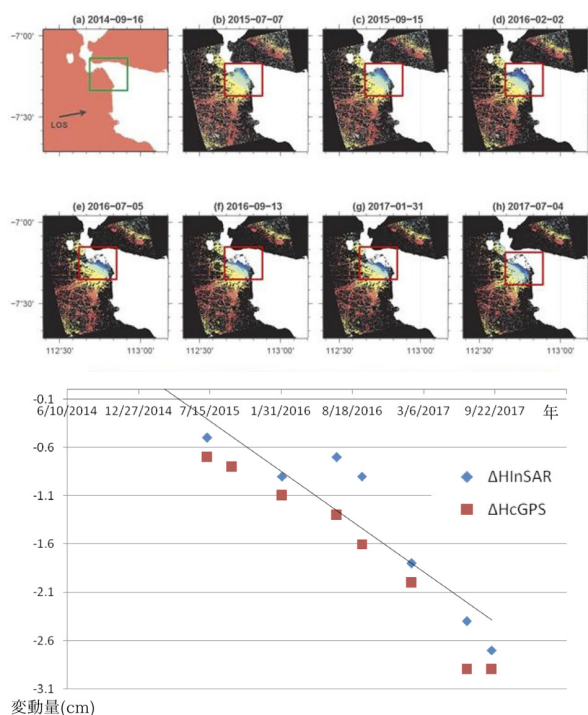


図4 インドネシア・スラバヤ市の地盤沈下DInSAR解析結果とGPS計測との比較

スラバヤ市の東部と北東部に明確に沈下が大きい箇所が見られ、GPSによる測量結果でも整合性のある結果が得られている。我が国では、国土地理院が全球測位衛星観測システム(GNSS)を運用しており、現場での水準測量の情報が得られない場合でも、画像の解析範囲にGNSSデータが存在すれば、同様の解析を行うことが可能である⁵⁾。

図5は、インドネシア・スラバヤ市で地盤沈下GPS計測と現地踏査の様子を示している。地盤沈下の主な原因としては地下水の汲み上げが疑われており、現地調査やメディアの情報によると、多くの都市で、地盤沈下により橋や排水設備、ガスパイプライン、建物の損壊が発生していることが報告されている。



図5 インドネシア・スラバヤ市で地盤沈下GPS計測と現地踏査の様子

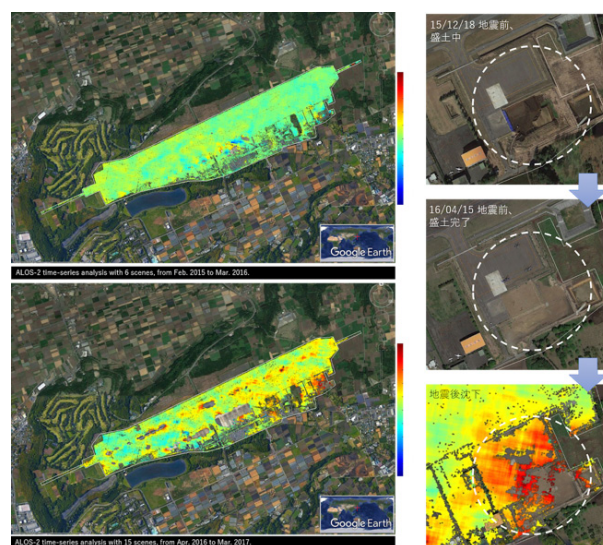


図6 2011年4月熊本地震の熊本空港の地盤沈下DInSAR解析結果⁶⁾

3-3. 熊本空港の地震被害

図6は、2016年4月の熊本地震後の熊本空港の変動傾向をALOS-2/PALSAR-2でDInSAR解析した結果である⁶⁾。左上の2016年3月までの6シーンによる解析では、敷地内で目立った動きは見られなかったが、左下に示す地震後の2016年4月から2017年3月までの15シーンを用いた解析では、敷地内で局所的な変動がいくつか見られた。地震後に変動が最も大きく計測された箇所について、右図に拡大したところ、光学写真では地震前に実施された盛土の様子が映し出されており、DInSARによる解析の結果、最大で年あたり8cm程度の沈下が見られ、地震によって盛土直後の地盤が圧密沈下で下がったと推測される。

紙面の制限でここに掲載することはできなかったが、ダムの堤体、工場設備ど、多数のインフラヘルスマニタリングに関する解析事例が掲載されているので、参考にされたい⁶⁾。

4 さいごに

本稿では、リモートセンシング技術のうち、近年特にデータ入手性・技術開発が著しい衛星搭載型の合成開口レーダ（Synthetic Aperture Radar, SAR）に着目し、地盤変動の観測原理、社会インフラへの観測技術の活用推進に関する技術開発と実用例を紹介した。SARは2018年から2022年の5年間にかけ、CSG（COSMO-SkyMed Second Generation）（イタリア）、TerraSAR-NG（ドイツ）、RCM（RADARSAT Constellation Mission）（カナダ）、Sentinel-1C,1D（欧州）、先進レーダ衛星（日本）など、多くの衛星の打ち上げが予定されており、データの充足度は加速的に進んで行く。一方で、SARを用いたインフラヘルスマニタリングは、民間事業者、大学、関係省庁（内閣府、文部科学省、国土交通省など）で、様々な技術開発と利用が進みつつある。既存のインフラ現場でモニタリング結果の実証、検証試験を行い、試験結果をフィードバックしながら実用化に資する技術とするためには、産学官の緊密な連携体制が必要となる。そのためには、NASAが実施している技術成熟度⁷⁾のインフラヘルスマニタリング版を作成し、技術開発の指針となる全体の見取り図を作成することも、大変有用であると考えられる。

〈参考文献〉

- 1) 大内和夫（2009）：リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎（第2版改訂版），東京電機大学出版局。
- 2) 環境省（2017）：地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル <http://www.env.go.jp/press/104084.html>（2018年3月13日）
- 3) Ram Avtar, Wataru Takeuchi, Pankaj Kumar, Ridhika Aggarwal, Ankita Gupta, S. Herth, Masumi Yamamoto（2016）. Evaluation of land subsidence using high resolution TerraSAR-X time series data in Negishi area. 第24回 生研フォーラム「宇宙からの地球環境・災害のモニタリングとリスク評価」：東京大学生産技術研究所（東京都目黒区）。
- 4) A. Aditiya, et al.（2017）：Land Subsidence Monitoring by InSAR Time Series Technique Derived From ALOS-2 PALSAR-2 over Surabaya City, Indonesia. Earth and Environmental Science, 98（1）, 012010. doi :10.1088/1755-1315/98/1/012010.
- 5) 国土地理院 全球測位衛星観測システム（GNSS） http://terras.gsi.go.jp/geo_info/geonet_top.html（2018年3月13日）
- 6) JAXA/EORC Infrastructure Monitoring Group：衛星 SAR によるインフラ解析事例 <https://sites.google.com/view/jaxa-infrastructure-monitor/>（2018年3月13日）
- 7) NASA application readiness level（ARL） <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/ExpandedARLDefinitions4813.pdf>（2018年3月13日）