

GNSS・SAR による開削工事での地表面変状モニタリング
～その 2：水準測量結果を利用した SAR 観測結果の高精度化～

国際航業(株) ○本田謙一 手束宗弘 武石 朗 加藤大佑
鹿島建設(株) 正会員 永谷英基 川野健一 劉 偉晨 新川健二 高柳 哲
東日本高速道路(株) 村田賢士 尾関 淳

1. はじめに

近年、測位衛星の増加に伴い、GNSS（Global Navigation Satellite System）測位技術が急速に発展している¹⁾。また、合成開口レーダと呼ばれる SAR（Synthetic Aperture Radar）を小型衛星に搭載し、複数小型 SAR 衛星の同時運用による高頻度での衛星観測が可能になってきた²⁾。前報³⁾では開削工事を対象に、GNSS および SAR による広域地表面変状モニタリングの概要および計測結果を報告した。本報では、地上で行った水準測量結果を活用した SAR 観測結果の高精度化について詳述する。

2. SAR による変位計測と課題

SAR は衛星に取り付けたレーダから地表に向けて電波を照射し、反射波から画像を作成するセンサである。2 回以上の異なる観測時期において同一対象を観測し、干渉処理（InSAR）を行うことで、地表面変状を高精度で捉えられる。なお、同じ SAR 衛星、かつ同じ軌道の観測画像が存在する場合のみ、干渉処理が可能である。

表－1 主な SAR 衛星の仕様

衛星名	COSMO-SkyMed	Sentinel-1	ALOS-2
運用国	イタリア	欧州	日本
波長帯	X バンド	C バンド	L バンド
波長	3 cm	6 cm	24 cm
空間分解能	3×3 m	5×20 m	3×3 m
検出変位量	2～20 mm	3～30 mm	2～120 mm
観測頻度	年 12 回	年 30 回	年 4 回
観測対象	人工物	人工物	植生域
観測費用	高額	無償	比較的安価

ここで、主な SAR 衛星の観測仕様を表－1 に示す。SAR による干渉処理で得られる変位は衛星視線方向の相対変位であり、SAR のみでは絶対変位を計測できない。また、SAR 衛星の選び方によって観測に用いる電波の波長帯は異なるが、選定した波長帯ごとに長所・短所がある。すなわち、高精度な変位計測の実現には、適切な波長帯および観測画像の解析処理方法の選定が重要である。

3. SAR 観測結果の高精度化

解析に用いた SAR 衛星の観測情報を表－2 に示す。SAR 観測結果を水準測量結果で補正することによる、計測結果の高精度化の可能性を検討した。まず、多次元時系列解析によって

表－2 解析に用いた SAR 衛星の観測情報

衛星名	軌道	観測期間	観測回数
Sentinel-1A	南行	2020/4/3～2022/11/19	79
Sentinel-1B	北行	2020/3/28～2021/12/12	50
COSMO-SkyMed	南行	2020/3/16～2022/11/21	26

各軌道での鉛直・東西時系列相対変位を算出した。次に、衛星からの視線方向変位に換算した水準測量結果を用いて相対変位を絶対変位に補正した。本報で検討対象とした観測範囲は GNSS 観測局数が少なかったため、SAR 観測結果における最大沈下点近傍の水準測量結果を用いた。その後、複数の SAR 衛星から得た多軌道・複数バンドでの観測画像に基づく鉛直・東西時系列絶対変位を統合した。すなわち、多次元時系列解析を用いて、Sentinel-1 衛星の 2 軌道と COSMO-SkyMed 衛星の 1 軌道から得た観測画像を用いて算出した相対変位ベクトルを水準測量結果で絶対変位に補正し、軌道別に算出した絶対変位のベクトルを統合することで、鉛直方向と東西方向の時系列絶対変位を算出した。また、高分解能だが観測頻度は月 1 回程度の COSMO-SkyMed と、分解能は COSMO-SkyMed に劣るが継続的に 12 日周期で観測している Sentinel-1 を組み合わせることで、6 日周期で高解像度かつ高頻度の変位計測を実施できた。

キーワード 地表面変状モニタリング, RTK-GNSS, SAR, 多次元時系列解析, RMSE

連絡先 〒183-0057 東京都府中市晴見町 2-24-1 国際航業株式会社東京事業所 TEL 042-307-7211

4. SAR 観測結果

前報¹⁾と同様に、横浜環状南線公田笠間トンネル工事の開削工事エリア近傍で地表面変状モニタリングを実施した。SAR 観測結果から算出した 2020 年 3 月～2022 年 1 月までの鉛直方向の累積変位分布を図-1 に示す。2021 年 12 月中旬に Sentinel-1B の北行軌道観測が終了したため、2022 年 1 月までの南北両軌道が観測できている期間を対象とした。図-1 によると、沈下傾向を示す範囲は局所的であることが分かった。分布図は図中に示した最大沈下点近傍の水準測量結果で SAR 観測結果を補正した結果であり、当該地点での地表面沈下の経時変化を図-2 に示す。

ここで、水準測量結果を用いた補正の有無による SAR 観測結果の違いを図-3 に示す。補正有の場合、観測結果のばらつきを抑制できていることが分かる。さらに、RMSE（二乗平均平方根誤差）の比較結果を表-3 に示す。RMSE は真値からのばらつきの大きさを示す指標であり、RMSE が小さいほど精度が良い。水準測量結果による補正を実施しない場合の RMSE は 4.12 mm であるが、水準測量結果で補正した場合の RMSE は 2.85 mm であった。すなわち、水準測量結果で SAR 観測結果を補正することで、高精度化できた。

また、SAR の観測頻度は約 2 年で 109 回であり、概ね 6 日に 1 回の頻度で地表面変状を計測できた。今後も打ち上げ予定の SAR 衛星は多数あることから、これらの衛星を併用していくことで、さらなる高精度・高頻度計測が実現可能となると考える。

5. おわりに

SAR による多軌道・複数バンドに基づく地表面変状モニタリングを実際の現場にて適用した。さらに、SAR 観測結果に水準測量結果を組み合わせることで、計測結果の高精度化を実現した。今後も、SAR に水準測量や RTK-GNSS を組み合わせ、計測精度の向上に向けて開発を進める。

参考文献

- 1) 藤原優，横田聖哉，武石朗，飯島功一郎，江川真史：RTK-GNSS による地盤変位計測の高速道路法面への適用性に関する検証，土木学会論文集 F3（土木情報学），Vol.76，No.1，18-31，2020。
- 2) 川野健一，永谷英基，劉偉晨，手束宗弘，武石朗，本田謙一，加藤大佑：市街地における GNSS・SAR を併用した地表面変状モニタリング，土木建設技術発表会，II-9，2022。
- 3) 永谷英基，川野健一，劉偉晨，手束宗弘，武石朗，本田謙一，加藤大佑，村田賢士，尾関淳：GNSS・SAR による開削工事での地表面変状モニタリング～その 1：計測概要および GNSS・SAR 計測結果～，土木学会第 78 回年次学術講演会概要集，2023（投稿中）。

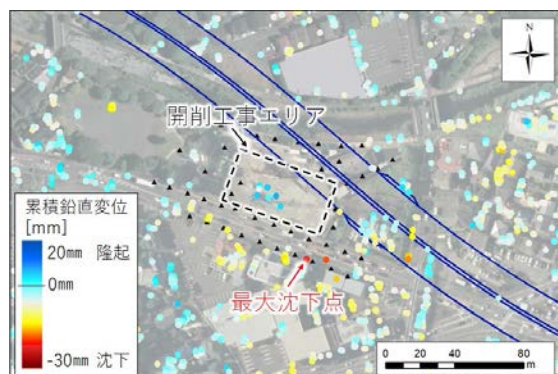


図-1 開削工事エリア近傍の累積鉛直変位分布



図-2 地表面沈下モニタリングの結果



図-3 最大沈下点における補正有無による SAR 観測結果の違い

表-3 補正有無による解析精度の違い

補正	RMSE (mm)
水準統合無し	4.12
水準統合	2.85