

トンネル工事における衛星を用いた地表面変化の観測手法の有効性検証

国際航業株式会社 ○正会員 佐藤 渉 正会員 本田 謙一 浅田 典親

東海旅客鉄道株式会社 吉岡 直行 藤田 康宏 田村 崇 藤家 祐太 道井 祥太

1. はじめに

リニア中央新幹線は工事の安全、環境の保全、地域との連携を重視して工事を進めており、都市部で実施するシールドトンネル工事では、地表面の変化など周辺の環境への影響を確認するとともに、地域住民に工事に関する情報を適時提供していく取組みを行うことを公表している。この取組みの中でも、地表面の変化の観測は重要であり、a) 水準測量によって公道の高さや傾斜の変化を計測し、b) 巡回によって地上の状況を監視し、c) 衛星 SAR によって計画路線周辺の地表面高さの変化を面的かつ時系列的に観測してゆく予定である。

本報では、衛星 SAR 観測を本格的に実施してゆくにあたり、その有効性を事前検証するとともに、衛星 SAR の変位計測精度向上などに活用できる GNSS 変位計測システムについても検証した結果を報告する。

2. 検討に使用する衛星データ

2. 1. 衛星 SAR

観測に用いる SAR 衛星は、変位計測精度が高い X バンド衛星の「COSMO-SkyMed」を用いている。本衛星は3機体制で運用されており、東京付近では概ね月2回毎に観測されている。

衛星 SAR の解析手法は Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR) という SAR 画像の中から安定した散乱点（構造物等）を選び出し、その位相情報を時系列的に解析する干渉 SAR 解析手法を用いた。また、相対変位として得られる解析結果を絶対変位に合わせるため、GNSS や水準測量で得られた変位量を用いて補正した¹⁾。

2. 2. GNSS 変位計測システム

Global Navigation Satellite System (GNSS) は、干渉 SAR 解析結果を補正するだけでなく、水準測量が困難な地点や、高頻度観測が必要な工事区間などでも活用できる可能性がある。事前検証する GNSS 変位計測システム²⁾は、トレンドモデルによる時系列統計処理により最高で1mm程度の変位を1時間間隔で得られることが分かっている。しかし、ビルや住宅が林立する都市域での高さ方向の変位計測精度に関する知見は少ないことから、SAR の変位計測精度検証と併せて実施した。

3. 変位計測精度の検証方法

検証地は発進立坑付近の工事エリアとした（図-1）。検証地周囲には建物と平坦地が混在しており、実際の観測対象路線と相似している。このような環境では、図-2 に示すとおり SAR 衛星の電波の反射強度に差異が生じることから、反射強度の異なる建物と平坦地における解析値の安定性（データのバラつき）を確認した。

また、衛星 SAR における最高レベルの変位計測精度を確認するため、X バンド用コーナーリフレクタ（以下 CR）を製作し設置し



図-1 衛星 SAR 視線方向から見た検証地

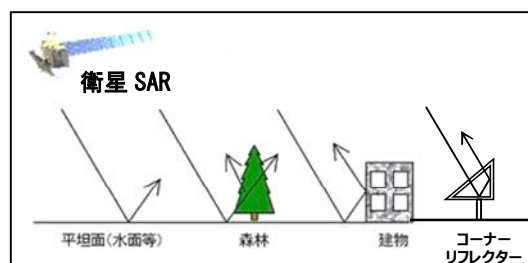


図-2 衛星 SAR の電波の反射イメージ



図-3 強制変位実験架台

キーワード 衛星 SAR, PSInSAR, コーナーリフレクタ, GNSS, シールドトンネル, 中央新幹線
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 TEL042-307-7210

た．X バンド用 CR は約 30 cm の平面の板を 3 枚組み合わせたもので，干渉性（コヒーレンス）の高い反射波が得られることから，平坦地でも正確な変位が得られる可能性がある．そこで，検証地の平坦地に設置した CR と GNSS の設置架台に 9.4 mm のプレートを含みこみ，後日そのプレートを抜き取ることで強制的に沈下を発生させ，解析結果と強制変位量とを比較した．

4. 変位計測精度の検証結果

4. 1. 衛星 SAR の解析値の安定性

図-4 に検証地周辺における衛星 SAR 電波の反射波の強弱を示す強度画像を示した．図中の白いメッシュは構造物や高層ビル，CR が位置しており反射強度が強いことを示している．一方，黒いメッシュは反射強度が弱いことを示しており，平坦地や河川などがそれに該当している．

図-5 には PSInSAR の解析結果を示した．図によれば反射強度が弱い平坦地や河川の計測値の安定性は悪く，RMSE（二乗平均平方根誤差）が±5 mm 程度であった．一方で，反射強度が強い低層構造物や CR は計測値の安定性が良く，RMSE が±2 mm 程度であった．なお，反射強度が強い高層ビルで計測値の安定性が悪いのは，建物の熱膨張変形や振動，SAR 解析に現れる標高誤差などの様々な要因が混在しているためと考えられる．

4. 2. CR および GNSS の強制変位実験結果

図-6 には設置架台を強制的に 9.4 mm 沈下させた実験結果を示した．衛星 SAR は視線方向の変位として観測されるが，ここでは沈下量に換算して示した．

CR に強制変位を与えた 6 月 1 日以降の PSInSAR の解析結果は，実変位に追随しており，RMSE は±2.6 mm であった．

GNSS に強制変位を与えた 4 月 20 日以降の解析結果は，統計処理の影響により正確な変位を検知するまでに 2.5 日程度の時間を要したが，RMSE は±0.7 mm と実変位をより正確に捉えられることが分かった．

5. まとめ

衛星 SAR および GNSS による地表面変化の観測の有効性を検証した結果，衛星 SAR は反射強度が強く得られる CR や低層構造物などで mm 単位の変位が検知できることが明らかとなった．また，反射強度が弱い地点を観測する場合には CR の設置が有用であることが分かった．さらには，GNSS を併用すればビルや住宅が林立する都市域でも，上空視界がある程度開いていれば 1 mm 単位の変位計測精度で安定的に観測できることが分かった．今後，本工事に衛星 SAR を用いて地表面高さの変化を観測してゆくにあたっては，CR や GNSS を要所に導入することで，信頼性の高い観測が実現できるものと考えられる．

<参考文献>

- 1) 佐藤弘行ら：ALOS/PALSAR データを用いた時系列干渉 SAR 解析による 5 基のロックフィルダムの外部変形計測，2017．
- 2) 岩崎智治ら：GPS を用いた自動変位監視のための Web システムの開発，2012．

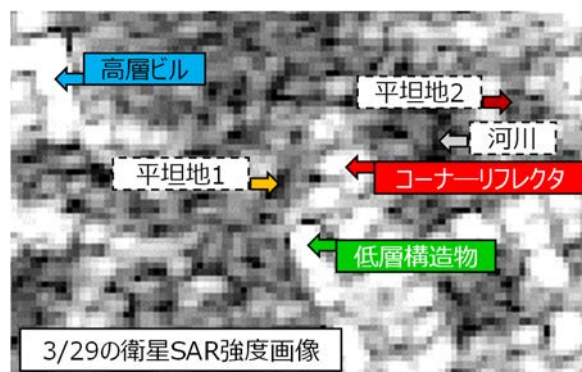


図-4 検証地の衛星 SAR の強度画像

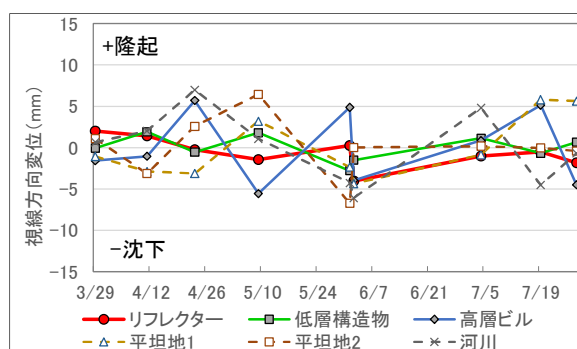


図-5 反射強度が異なる衛星 SAR の解析結果

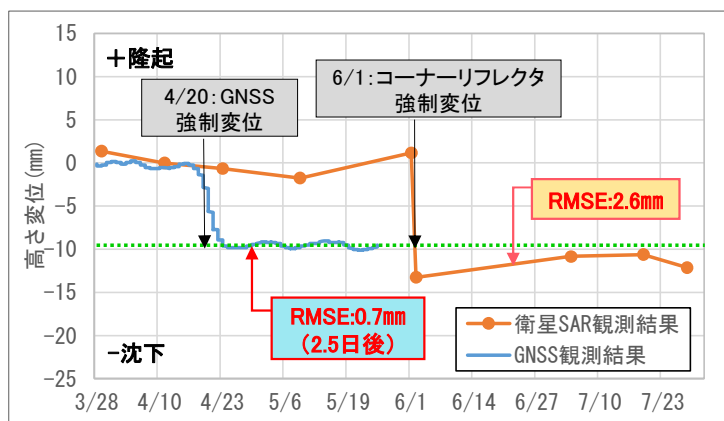


図-6 衛星 SAR ・ GNSS の強制変位実験結果