

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

鹿島建設(株) 正会員 ○川野 健一 永谷 英基
 正会員 劉 偉晨
 国際航業(株) 正会員 手束 宗弘 武石 朗
 正会員 本田 謙一 加藤 大佑

1. はじめに

近年、準天頂衛星みちびき（QZSS: Quasi-Zenith Satellite System）をはじめとする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。また、地球観測技術も進歩を続けており、合成開口レーダと呼ばれる SAR（Synthetic Aperture Radar）を小型衛星に搭載できるようになった。複数小型 SAR 衛星の同時運用によって高頻度に地表観測可能な地球観測衛星コンステレーションが構築され、悪天候で雲がある場合や太陽光が届いていない場合でも、地表を鮮明に観測できる体制が整備され始めた。そこで、本報文では市街地を対象に、広域での地表面変状を GNSS および SAR によって精度良くモニタリングできたので、その適用実績について報告する。

2. 地表面変状計測システム

(1) GNSS

代表的な GNSS 測位技術を表-1 に示す。測位方法によって、測定精度と測位時間は大きく異なり、鉛直精度は水平精度の 2 倍程度まで大きくなる。精度向上のためには測位時間を長くしたり、電波を受信する衛星の数や受信できる GNSS の台数を増やしたりする必要がある。日本のみちびきは 4 機体制の傾斜静止軌道衛星である。少なくとも 1 機以上の衛星がほぼ天頂付近に位置しており、米国の GPS と一体での運用が可能である。日米以外では、欧州の Galileo、中国の BeiDou、ロシアの GLONASS が整備されている。

本報文では、高速道路の現場でも試行的な運用²⁾が始まっているリアルタイムキネマティック法による GNSS（以下、RTK-GNSS）を用いて地表面変状を計測した。RTK-GNSS は、表-1 に示すスタティック法よりも機材が安価であり、新しい統計処理手法で計測精度を向上できる手法である。RTK-GNSS による地表面変状モニタリングシステム（図-1）では、図-2 に示す装置を用いて、観測局で計測した三次元座標を基準局で取得した情報を基に補正した後、基準局に無線で計測データを送信する。通信不能を避けるため、観測局と基準局の最大離隔は 500 m 程度が望ましい。また、基準局には図-2 に示すとおり、通信アダプタを取り付けており、計測データをクラウドに保存しているので、いつでもどこからでも計測データを閲覧できる。観測局では約 1 秒ごとに衛星から三次元座標データを取得しているが、観測局が複数ある場合は基準局へのデータ送信やデータ補正によるタイムラグが生じるため、クラウドへのデータ送信は 300 秒毎としている。

表-1 測位方法と精度

測位方法	水平精度	測位時間
単独測位	約 10 m	リアルタイム
干渉測位 キネマティック法	±2～3 cm	初点は数分 2 点目以降は リアルタイム
干渉測位 スタティック法	±0.5～1 cm	60 分以上



図-1 システム構成



図-2 GNSS 外観

キーワード 市街地、地表面変状モニタリング、GNSS、SAR、母集団移動平均法、恒星日差分法

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-489-1111

(2) SAR

表-2 に示すとおり、SAR はレーダを使って地表を電波で照射し、その反射波から画像を作成する技術である。レーダは雲を透過し、昼夜を問わずに観測できる特徴があり、使用するレーダの波長を変えることで様々な対象を観測できる。また、2 回以上の異なる観測時期から同一対象を観測し干渉処理を行う (InSAR) ことで、観測時期間の対象の変位を高感度で得られる。

例えば、高分解能・高感度解析のためには表-2 に示す波長帯が短い COSMO-SkyMed を選択する必要がある。人工物の観測に適しているが、植生域を対象に観測する場合はレーダが地表まで届かずに植生域で反射することから、植生域での観測には不向きで、観測データの取得費用も高額である。一方、Sentinel-1 は観測データの取得費用が無償、ALOS-2 は比較的安価に観測データを取得できるといった特長がある。

表-2 主な SAR 衛星

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 8 回	年 30 回	年 4 回

3. 都市部での実証実験

(1) 実験概要

市街地におけるシールド工事や開削工事において、工事による地表面の影響を監視するためには、広域での面的な地表面変状モニタリング³⁾が必須である。しかしながら、シールド工事においては、シールドマシン発進後は事業用地外での地表面変状モニタリングが必要となることから、測量設備を常設できる場所は少なく、スポット的な測量作業に頼らざるを得ない。そこで、RTK-GNSS の設置条件さえ満たせば、事業用地外でも測量設備を常設可能な電柱に RTK-GNSS を取り付け、リアルタイムでの地表面変状モニタリングを市街地で試行した。なお、RTK-GNSS を取り付ける電柱は全長が 15 m 以下であれば根入れ深さが全長の 1/6 以上あり、全長が 15 m を超える場合は 2.5 m 以上の根入れ深さがあることから、地表面の変位と電柱の変位に相対差は生じないと推察される。

図-3 に示すとおり、5 階建の鉄筋コンクリート構造物の屋上に基準局 K-1 (図-4(c)) を設置し、片側一車線の道路脇の電柱に観測局 G-2 と G-3 (図-4(a)) を設置した。また、気温変化で構造物のコンクリートが膨張収縮して屋上に設置した基準局に影響が及ぶ可能性があることから、不動性を担保するために地上に自営柱を設置し、観測局 G-4 (図-4(b)) を設けた。RTK-GNSS の設置位置に関して、電柱の場合は地上から高さ 5 m、自営柱の場合は地上から高さ 2 m の位置に設置した。

また、InSAR (X バンド) による変位検知性能もあわせて検証した。SAR 衛星から発射した電波の反射強度を確保するために、5 階建の鉄筋コンクリート構造物の屋上四隅に四角三面リフレクター (図-4(d)) を恒久散乱点として設置した。



図-3 RTK-GNSS 配置図

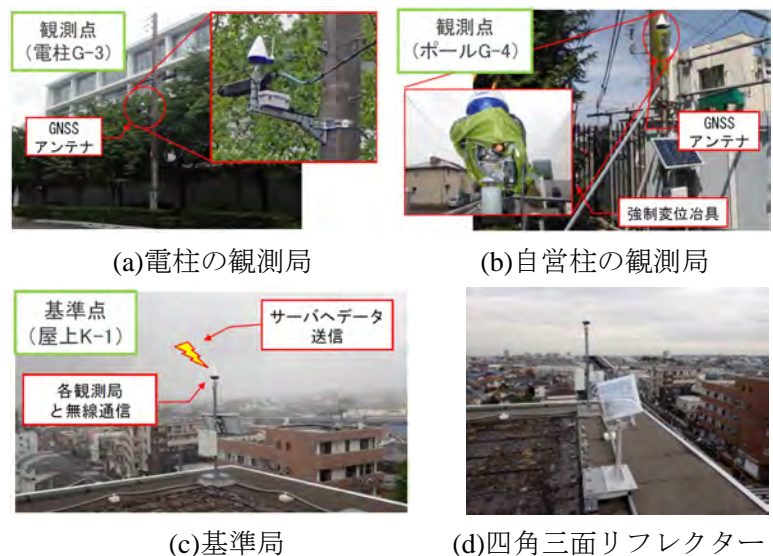


図-4 RTK-GNSS 設置状況

(2) 多重反射による計測誤差の検討

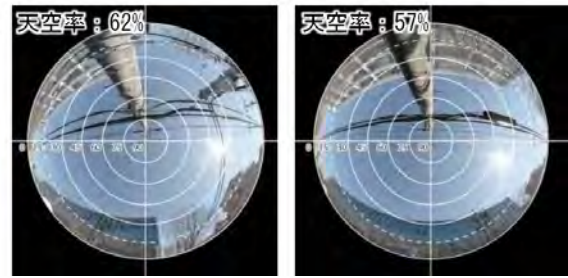
図-3 に示すとおり、観測局とした電柱は片側一車線の狭い道路沿いにあり、両側に鉄筋コンクリート5階建の構造物、ならびに周辺に住宅が存在することから、通行車両や構造物からの多重反射、ならびに上空視界の制限による計測誤差が懸念された⁴⁾。

そこで、多重反射の影響を検討するため、天空率(図-5)を確認した。電柱に取り付けたGNSSから上部を撮影し、全天画像に占める空の面積の比率を定量化した値が天空率である。図-5 から、南北方向に位置する構造物で空の面積が遮られていることが分かる。衛星は南側に軌道があることから、南方向が遮られている場合は計測精度が落ちる可能性が高い。また、これまでの計測実績から、RTK-GNSSによる計測値の標準偏差と天空率の相関関係(水平方向、鉛直方向)を図-6 に示す。天空率が小さくなると標準偏差が大きくなる傾向を確認できる。図-6 中に示す観測局 G-2 ならびに G-3 での計測結果は、標準偏差がより大きくなっていることから、多重反射の影響を受けて計測精度が低下していると判断できる。

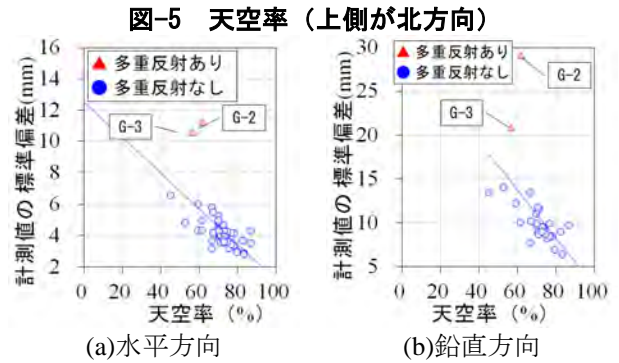
RTK-GNSS の計測精度は表-1 に示すとおり、水平方向の計測精度にして2~3 cm であるが、地表面変状をモニタリングする際、水平方向に比べて計測精度が劣る鉛直方向に対して、ミリ単位の計測精度が必要となる。強制変位を与えた際の計測精度を検証した既往の実験^{2),5)}から、鉛直方向への強制変位2~5 mm に対して、±1 mm の精度で計測可能であると報告されている。そこで、既往の報告同様に、ミリ単位の計測精度を確保するため、図-7 に示す母集団移動平均法(24時間での移動平均)による誤差処理⁴⁾を実施した。母集団移動平均法はリアルタイムで計測した24時間分の計測データを連続的に平均する統計処理手法であり、その結果を図-8 に示す。当該手法によって計測値の標準偏差は顕著に小さくできる。一方、高精度化を期待できる反面、変位の検出は24時間の遅れを伴うことから、リアルタイムに変位を把握したい場合は別のデータ統計処理方法である恒星日差分法^{5),6)}を用いる必要がある。

(3) 計測結果

観測局 G-3 での長期計測データを図-9 に示す。図中に示す青点は全ての計測点を示しており、赤線は母集団移動平均法で求めた値である。



(a)観測局 G-2 (b)観測局 G-3



(a)水平方向 (b)鉛直方向

図-6 計測値の標準偏差と天空率の関係

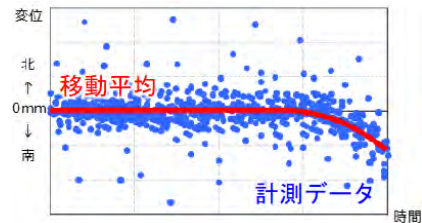
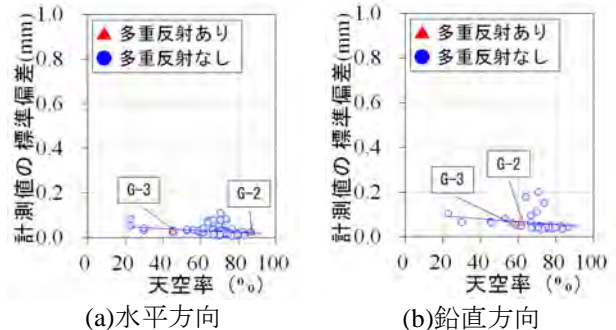


図-7 母集団移動平均法 の概念



(a)水平方向 (b)鉛直方向

図-8 母集団移動平均法における計測値の標準偏差と天空率の関係

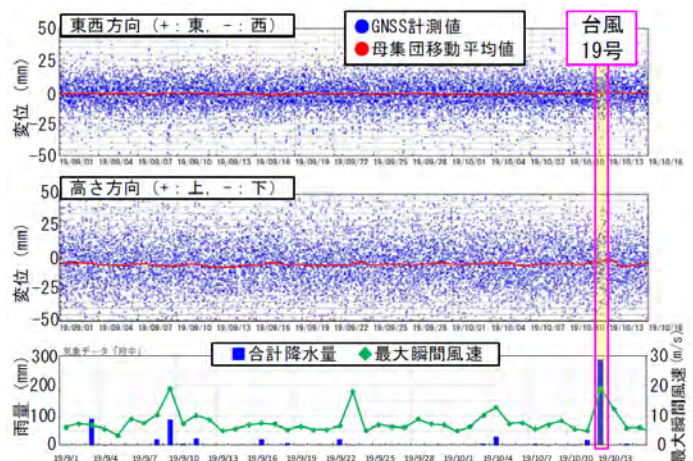


図-9 長期計測結果 (観測局 G-3)

RTK-GNSS は計測値の標準偏差は大きいですが、高頻度で計測できる点がメリットである。母集団移動平均法を適用すれば、長期間においても安定的に計測できることも確認した。特筆すべきは、2019年の台風19号が襲来した際、RTK-GNSSは最大瞬間風速20 m/sの強風と累積雨量300 mmの豪雨にさらされたが、継続した計測が可能であり、荒天時でも安定的に計測できることを確認した。

また、2021年3月12日には、図-4(d)に示すリフレクターに鉛直下向きに強制的に変位を付与して計測を行った(図-10)。強制的に付与した変位量は、リフレクターCR-1が5 mm、リフレクターCR-2が10 mmである。この時のInSAR(Xバンド)による変位検知結果を図-11に示す。今回使用した衛星はCOSMO-SkyMedであり、入射角は31°であることから、付与した鉛直変位5 mmおよび10 mmは衛星からの視線方向変位にして、4.3 mm、8.6 mmと換算できる。付与した鉛直変位を視線方向変位に換算した値を図-11中に示しているが、強制変位と概ね同等の値を観測することができた。過小評価の傾向はあるが、リフレクターを設置することで5 mm以上の変位であれば明確に捉えられることが強制変位実験で確認できた。すなわち、反射強度が弱い場所でも、反射強度を高めることができるリフレクターを準備できれば、InSARによる観測結果だけでも5~10 mmの鉛直変位を確実に捉えられることが判明した。

4. 市街地における実工事での適用

(1) 実施概要

市街地におけるシールド工事に付随する開削工事において、開削工事前後の地表面の変状を監視した。開削工事は2020年5月から開始し、2021年9月に床付け掘削が完了した。図-12にRTK-GNSSの配置図を示すが、開削工事エリア周辺は軟弱地盤が広がっており、当初から開削工事による地表面変状の影響が懸念されていた。そこで、開削工事エリアを囲むようにRTK-GNSSを3か所(図-13)に設置した。いずれも事業用地外であることから、電柱に取り付けて常設の観測局とした。また、基準局は開削工事の直接的な影響を避けるために、開削工事エリアの影響を受けない場所(図-12内のK-1)に設置した。RTK-GNSSの計測は開削工事の途中となる2021年8月から開始し、現在も継続的に計測している。

あわせて、InSARによる開削工事エリアの地表面変状モニタリングも並行して実施した。表-2に記載したCOSMO-SkyMed(Xバンド)、Sentinel-1(Cバンド)を活用し、開削工事前後の地表面変状を監視した。なお、X



図-10 リフレクターの強制変位



(a)CR-1 (強制変位 5 mm) の視線方向変位

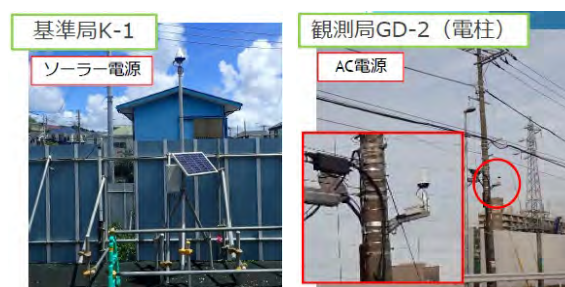


(b)CR-2 (強制変位 10 mm) の視線方向変位

図-11 強制変位実験結果



図-12 RTK-GNSS 配置図



(a) 自営柱の基準局

(b) 電柱の観測局

図-13 RTK-GNSS 設置状況

バンドの場合は波長が短いことから、リフレクターは一辺が 30 cm 以上あれば十分な反射強度を確保できるが、C バンドは一辺が 50 cm 以上のリフレクターが必要になる。InSAR に関しては、2020 年 2 月まで遡及した観測データから分析を開始し、現在も定期的に観測を続けている。

また、開削工事エリアでは観測局 GD-2 近傍において定期的に水準測量を実施していたことから、RTK-GNSS による計測結果および InSAR による観測結果と鉛直方向の変位を比較した。

(2) 多重反射の影響

3 章に記載した実証実験と同様に、事前に基準局と観測局の天空率を確認した。図-14 に基準局と観測局の天空率を示す。図から、観測局 GD-1 の天空率は 56% と実証実験時の天空率（図-5）と概ね同等であった。幹線道路沿いの電柱は付帯設備やケーブル配線が多く、天空率が悪くなる傾向にある。一方で、基準局 K-1 およびその他の観測局は付帯設備がほとんどなく、良好な天空率（78～89%）を確保できた。

なお、計測期間における観測局での計測結果の標準偏差を表-3 に示す。天空率が比較的悪い 56% の場合でも、計測データ

を母集団移動平均法で処理すれば、標準偏差にして ± 1.0 mm の計測精度を確保できた。すなわち、天空率が悪い場合でも、母集団移動平均法を用いることで、計測精度への影響を顕著に軽減できることが分かった。

(3) 計測結果の比較

RTK-GNSS による長期計測結果を図-15 に示す。RTK-GNSS を設置した 2021 年 8 月から 2022 年 7 月までの計測結果であり、当該計測期間において沈下量が最も顕著であった観測局（GD-2）の計測データを示している。図-15 に示すとおり、開削工事が継続している期間の内、RTK-GNSS を設置している期間は継続して変位が生じた。なお、計測期間の途中で欠損データが存在しているが、GNSS の精度向上のために計算プログラムを更新したことから、計測を中断した期間である。

また、水準測量結果を図-16 に示す。GNSS の設置開始（2021 年 8 月）から床付け完了後の残留沈下が収束する（2022 年 4 月）頃までに生じた沈下量は 9 mm であった。その後、2022 年 7 月までに地表面が 4 mm 隆起した。図-15 に示すとおり、同期間における GNSS による沈下量は 11 mm であり、隆起量は 3 mm であることから、水準測量と GNSS での計測結果は良く整合している。このように、RTK-GNSS の計測精度は、既往の報告²⁾どおり、概ね ± 1 mm を担保できている。

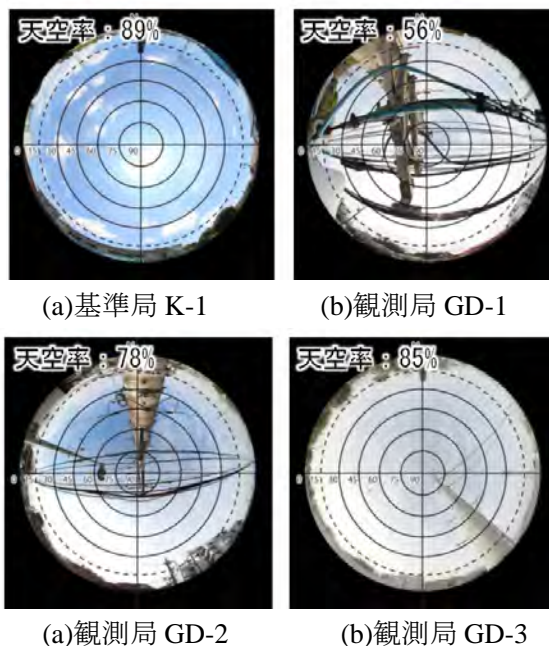


図-14 天空率（上側が北方向）

表-3 天空率と計測精度

観測局	天空率 (%)	計測結果の標準偏差
GD-1	56	1.0
GD-2	73	0.8
GD-3	85	0.3

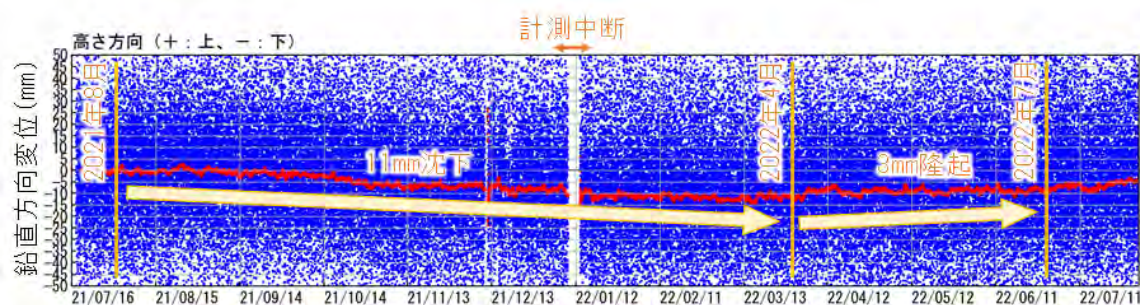


図-15 長期計測結果（観測局 GD-2）

次に、InSAR による鉛直方向の時系列変位を図-17 に示す。観測局 GD-2 において、開削工事が始まった2020年5月から2022年1月までの沈下量を過去の観測データに遡って分析したところ、沈下量は14 mmであった。同期間における水準測量で計測した沈下量は図-16 から13 mmであり、水準測量と InSAR の観測結果は良く整合している。

以上の結果から、衛星観測技術の向上に伴って、市街地での適用が期待されていた GNSS と InSAR による地表面変状モニタリング⁸⁾を検討した。その結果、多重反射の影響を大きく受ける市街地においても、母集団移動平均法を適用すれば、GNSS および InSAR は十分な精度(概ね±1 mm)を持って地表面変状をモニタリングすることが可能であることが明確になった。

5. おわりに

市街地におけるシールド工事や開削工事において、工事の影響による地表面変状を面的に監視するために、GNSS および InSAR による地表面変状モニタリングを実適用し、実用に耐えうる計測精度があることを確認した。今後、GNSS のさらなる精度向上や、GNSS と InSAR を組み合わせることで InSAR による観測データの精度向上の実現に向けて開発を進める。

参考文献

- 1) shamen-net 研究会：[新]知っておきたいGPS/GNSSのはなし，pp.37-39，shamen-net 研究会，2019。
- 2) 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。
- 3) シールドトンネル施工技術検討会：シールドトンネル工事の安全・安心な施工に関するガイドライン，p.32，2021。
- 4) 加藤大佑，武石朗，手束宗弘，永谷英基，久保田光太郎，吉迫和夫：計測環境が良くない市街地での GNSS における変位計測の適用例，土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会，VI-1064，2020。
- 5) 永谷英基，久保田光太郎，吉迫和生，武石朗，手束宗弘，加藤大佑：電柱を利用した GNSS による地表面変位連続モニタリング技術，土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会，VI-1063，2020。
- 6) 加藤大佑，武石朗，手束宗弘，永谷英基，川野健一：RTK-GNSS 計測の誤差評価に関する一考察，土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，VI-141，2021。
- 7) 佐藤渉，本田謙一，引地慶多，佐藤匠，川野健一，永谷英基：合成開口レーダのリフレクターによる位相安定性の検討，土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，CS9-33，2021。
- 8) 手束宗弘，永谷英基，川野健一，加藤大佑，本田謙一：市街地での GNSS と InSAR における変位計測の適用の可能性，地盤工学会誌，Vol.70，No.1，26-30，2020。

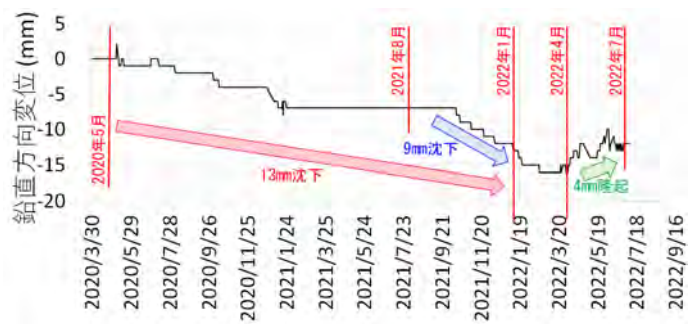


図-16 水準測量による長期計測結果(観測局 GD-2)



図-17 InSAR による長期計測結果(観測局 GD-2)