

第IV部門 TerraSAR-X 画像を活用した都市部の平常時地盤変動モニタリングの検証

京都大学大学院工学研究科 学生会員 ○楠瀬 智也
 京都大学大学院工学研究科 正会員 須崎 純一

1. はじめに

1960年代に地下水の揚水規制が実施され、高度経済成長期に深刻な社会問題となっていた全国的な地盤沈下は収束に向かっている。しかし、それによって新たに地下水位の回復が促され、都市部を中心に新たに地盤が隆起する可能性が指摘されている。地盤隆起はかつて国内で発生した地盤沈下の量と比較すると小さく、軽視されやすい傾向にあるが、隆起量の蓄積から地盤隆起災害発生の危険性が懸念される。一方で、こうした現状の実態把握を行う水準測量データは空間的に疎であるという課題がある。この課題を解決するため、近年、衛星搭載の合成開口レーダー(Synthetic Aperture Radar: SAR)を活用した面的な測量の試みが行われている。具体的には、複数時期のSAR画像における位相変化から対象の変動速度を算出する差分干渉 SAR (Differential Interferometric SAR: D-InSAR)を時間軸方向に拡張した時系列 SAR 解析の適用が検討されている。本研究では、TerraSAR-X から撮影されたXバンド画像を活用した時系列SAR解析によって面的な地盤変動のモニタリングを試み、水準測量データの補完の検討や、地下水位変動との関連性について検証する。

2. 対象地域及び使用データ

本研究では、解析対象地域を東京都内の調布市、三鷹市、武蔵野市、杉並区、練馬区を主に含んだ約 15 km × 20 km 程度の地域とした。この地域では定常的に年間 6 ~ 7 mm 程度の地盤隆起が観測されており、東京都の水準基標測量成果表[1]によれば、これは東京都の中でも特に大きな値である。使用する SAR 画像については、TerraSAR-X から取得される X バンド画像を使用し、2017 年 6 月から 2019 年 11 月までにかけて下降軌道で撮影したものを 23 枚用いた。X バンド画像は C バンドや L バンドの衛星画像と比較して波長が短いため、空間分解能が高く、表面の粗さに対する感度が高いことから、構造物が密集している都市部での解析に有効である。変動速

Tomoya KUSUNOSE and Junichi SUSAKI
 kusunose.tomoya.37w@st.kyoto-u.ac.jp

度推定においては、国土地理院が提供している 10 m メッシュの数値標高モデルを用いた。精度検証にあたっては、東京都の水準基標測量成果表の 2017 年から 2019 年の 3 年間のデータを検証用データとして使用した。

3. PSI を用いた地盤変動速度推定

本研究では、時系列 SAR 解析の中でも高い精度で変動速度を推定できる Persistent Scatters Interferometry (PSI)[2]を用いた。PSI は多時期の SAR 画像から後方散乱が強く、その特性が変化しないピクセル(Persistent Scatterer: PS)のみを抽出し、PS における時系列的な変動を D-InSAR により推定する手法である。SAR 画像解析から得られる変動推定量は、衛星の視線方向の変動量であるため、検証用データと比較する際、推定変動量を視線方向角の余弦成分で除すことで鉛直方向の変動量を算出した。また、本研究で使用する画像は全て下降軌道のデータであり、上昇軌道と下降軌道を組み合わせるといった 2.5 次元解析のような多方向での解析は困難であるため、鉛直方向のみの 1 次元での解析を検討した。解析時間の短縮のため、解析対象地域を縦 3 面 × 横 2 面に領域を 6 分割し、それぞれの領域に対して PSI を実行した。その後、分割領域内に存在する水準測量点の中で、標準偏差が最小なものを基準とし、その点と最も近傍の PS の変動速度を揃えることで、絶対変動速度への変換を行った。

4. 検証

まず、PSI の鉛直方向変動量の解析結果と対象地域に存在する 76 点の水準測量データとを併せてプロットしたものを図 1 に示す。図 1 から、調布市、三鷹市、武蔵野市で明瞭な地盤隆起傾向の検出が出来ており、概ね水準測量結果と合致していることが分かる。この時、RMSE は 1.0 [mm/year]であり、高い精度で変動速度を推定出来ていることが示された。精度検証時においては基準として使用した点 (6 点) 及び水準測量点と最近傍の PS との距離が 20 m 以上の点 (7 点) を取り除いた 63 点で検証

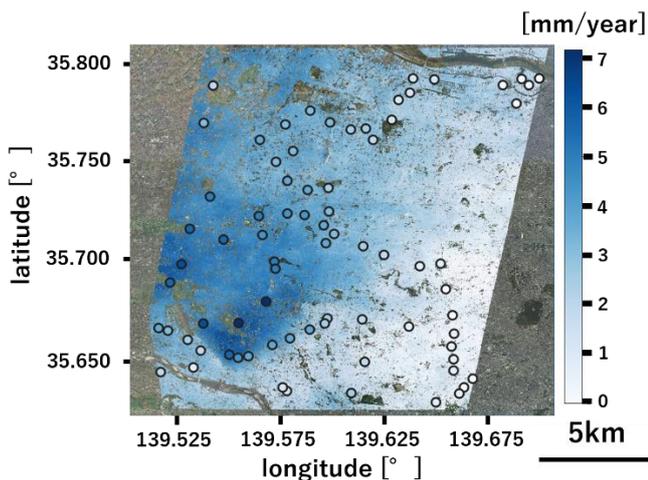


図 1: PSI 解析結果
(青色の丸は水準測量結果を示す)

を行っている。精度検証結果から、SAR 画像解析の結果を面的な水準測量データとして補完できる可能性が示唆された。

次に、地下水位の変動量と地盤変動との関連性について検証を行う。一般的に、地下水位変動量と地盤変動量との間には正の相関にあると指摘されている[3]ものの、地盤変動観測データと地下水位変動観測データとが同一地点に存在するケースは少なく、定量的にそれらの関係性を検証することは困難である。そこで、PSI によって面的に推定された地盤隆起図を基に、東京都の地下水位変動データ[1]との関連性を調べる。まず、解析対象地域に存在する観測井データから 2017 年～2019 年までの 3 年間の地下水位変動量の平均値をプロットし、PSI 解析結果と併せたものを図 2 に示す。この時、地下水位変動量の点と最近傍 PS の地盤変動量との間での相関を調べたところ、決定係数 R^2 は 0.77 となり、強い相関が示されていることが確認された。また、東京都全域で 3 年間の地下水位変動量の平均値が 1 m を超えていた観測井は調布市、小金井市、三鷹市のみであり、PSI 解析対象地域は特に地下水位の変動が著しい地域であることが確認されている。この結果から、地下水位の著しい上昇が地盤隆起を促進している可能性をより裏付ける結果が得られたといえる。

5. 結論

本研究では東京都内で特に地盤隆起量の大きい地点が報告されている地域を対象とし、PSI を用い、広域的な地盤変動のモニタリングを試み、解析結果と水準測量結果との比較による精度検証を行った。また、地下水位変動

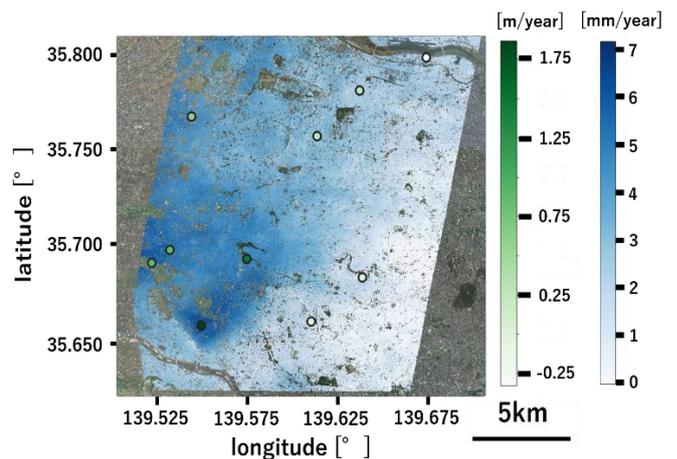


図 2: PSI 結果と地下水位変動データとの統合図
(緑色は地下水位変動量、青色は地盤隆起量を示す)

量との関連性についての検証を行った。

まず、水準測量結果との精度比較において、水準測量のデータ点と最近傍の PS との距離が小さい組を対象とし、精度検証を行ったところ、鉛直方向に対し RMSE が 1.0 [mm/year] と高い精度で地盤隆起を検知出来たことから、SAR 画像解析結果を空間的に密な水準測量データとして扱える可能性が示唆された。

次に、地下水位変動量との関係性について、地下水位変動量のデータ点に対し、最近傍の PS との相関関係を調べた。その結果、決定係数 R^2 が 0.77 と強い相関関係が示された。したがって、地下水位の変化と地盤の変動との関係性をより裏付けられる結果を示すことが出来たと考えられる。今後の課題としては、別地域での検証を行うことや、地上データとの組み合わせから多方向での解析を検討する必要がある。

参考文献

- [1] 東京都建設局：水準基標測量成果，<https://www.kensetsu.metro.tokyo.lg.jp/jigyo/tech/start/03-jyouthou/suijun/suijun.html>, (2021 年 2 月 15 日アクセス).
- [2] A. Ferretti, C. Prati, and F. Rocca, "Permanent scatterers in SAR interferometry" IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol. 39, pp.8-20. 2001.
- [3] Devin L. Galloway, Thomas J. Burbey, "Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction" Hydrogeology Journal, Vol.19, pp.1459-1486, 2011.