

| | | | |
|--|--|----|--------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | 重光 勇太朗 |
| 論文題目 | Advances in displacement monitoring of the Earth's surface based on satellite InSAR analysis and development of drone SAR system (衛星 InSAR 解析とドローン SAR システム開発による地表変動モニタリングの高度化) | | |
| <p>(論文内容の要旨)</p> <p>合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar; SAR) の強度画像の解析および干渉 SAR (Interferometric SAR; InSAR) 解析は, 広域の地表面を高い空間解像度でモニタリングし, 地表面変化や地表変動を測定するためのリモートセンシング手法の一つである. SAR 及び InSAR 解析は, 地震や火山噴火などの広域自然災害や地下水等の地下資源の開発などに関連する地表面変化の検出や地表変動の推定において成果を挙げている. 特に地震前後に撮影された 2 シーンの衛星 SAR データペアを用いた InSAR 解析は, 地震時 (co-seismic) の地表変動を推定するのにその有効性を発揮してきた. 近年では複数の SAR データを用いる InSAR 時系列解析の発展によって, 地震間 (interseismic) と地震前後 (pre/post-seismic) の長期間の地表変動を評価することが可能となり, ますますその重要性が増している. 2018 年に発生したモーメントマグニチュード (Mw) 5.6 の大阪北部地震の前後における地表変動の特性ならびにその発生の要因は未解明であった. また, 地震等による地表変動の推定に重要な上下東西南北の 3 次元方向の地表変動データの取得は, 軌道制限のある衛星 SAR による観測では依然として困難である. そこで本研究では, 研究対象として 2018 年の大阪北部地震における地表変動推定とそのメカニズムの解明に取り組んだ. まず, 欧州宇宙機関の衛星 SAR である Sentinel-1 により 2015 年から 2020 年末までに取得された SAR データを用いて, 時系列 InSAR 解析の一つである Persistent Scatterer InSAR (PSInSAR) 解析を行った. その結果, 地震前後において長期的な地表変動傾向の変化を推定し, 地下水位データと比較することによってそれらの相関性の変化を明らかにした上で, 大阪北部地震に伴う地表変動傾向変化のメカニズムを説明する帯水層の力学モデルを新たに提案した. 次に, 衛星 SAR データを補完するための新規プラットフォームとして, 観測のタイミングと軌道を柔軟に決めることが可能なドローンに着目し, ドローンに SAR を搭載したドローン SAR システムの開発, 観測および解析を実施した. 本論文は 6 章から構成され, その概要は以下の通りである.</p> <p>第 1 章では, 序論として研究目的および研究背景について述べた.</p> <p>第 2 章では, 衛星 InSAR の地表変動解析とその応用, 特に地震時や地震間, 地震前後の地表変動の研究や地表変動と地下水位変化の相関関係のメカニズムに関する研究をレビューした. 次に, ドローンによる SAR 観測と解析について, 基本的な手法の整理とともに, 現状と課題について概説した.</p> <p>第 3 章では, 2018 年大阪北部地震の前後, 阪神地域の主要活断層付近の地表変動推定の結果について述べた. Sentinel-1 衛星の観測による 72 シーン (2015–2020 年) の SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施し, 衛星の視線方向から鉛直方向と東西方向への変換を行うため, 2.5 次元解析による地表変動成分の分解を行った. その結果, 大阪平野と京都盆地での長期的な地表変動の傾向変化が明らかとなった. 地震前のデータに基づく解析では, 高槻市の近くの有馬-高槻断層帯や生駒断層帯などの地域での地下水位の上昇が原因と考えられる地表の隆起が観測された. 一方で, 地震後のデータに基づく解析では, 全体的に隆起の傾向が確認された. 特に, 有馬-高槻断層帯の南部や生駒断層の西部では, 地表の隆起が顕著になった. また, GNSS のデータとの比較に</p> | | | |

| | | | |
|------|---------|----|--------|
| 京都大学 | 博士 (工学) | 氏名 | 重光 勇太朗 |
|------|---------|----|--------|

より解析手法と解析結果の妥当性を検討した結果、PSInSAR 解析による地表変動の推定は高い精度であることが実証された。

第 4 章では、2018 年大阪北部地震が地表変動と地下水位の相関性に及ぼす影響について、PSInSAR 解析で得られた地表変動と 21 地点の地下水観測データを用いて検討した。地表変動と地下水位変化の相関性には、単調変化の経年変化成分と周期変化の季節性成分が含まれる。そこで、季節性成分に主眼をおいて、地表変動と地下水位変化の相関性を定量的に評価する指標として、2 つの時系列データセット間の相関の強さを測定する統計的指標である相互相関係数を計算した。その結果、地震前後の地表変動と地下水位変化の相関性は正、負、無相関の 3 種類に分類でき、地震後に負の相関を示す地下水観測地点が地震前より増加したことが示された。この負の相関の増加について、降水量データに基づく地下水位変化の計算と、地下水位変化による地表変動への影響の度合いを示す擬弾性定数の計算の 2 つのアプローチにより、地震発生後における長期の地表変動傾向変化のメカニズムを検証した。それにより、地震に起因して帯水層の浸透率が増加したことにより、地表変動と地下水位変化の負の相関が強まったことを定量的に示した。最終的には、新しい帯水層力学モデルを提案し、地震が地下水システムの挙動を大きく変化させ、地域の地表変動パターンに影響を与える可能性があることを示した。具体的には、地震の振動により、独立していた帯水層どうしの連結性が高まり、帯水層構造が変化した結果、間隙水圧の影響が減少し、地下水の荷重負荷の影響が増加するため、地下水位の上昇にもかかわらず地表が沈降する負の相関が発生したことを示唆した。これにより、Mw 6 クラスの地震が広範囲にわたる帯水層特性の変化を引き起こす可能性が初めて確認された。また、本研究は帯水層特性の空間的な複雑さや非均質性を示唆し、2018 年大阪北部地震による地表変動傾向変化と地下水動態変化のメカニズムの解明に貢献した。

第 5 章では、実地においてドローン SAR 観測実験を行い、ドローン飛行速度とレーザ照射角が SAR 強度画像の解像度や反射強度にどのように影響を与えるかに関する検討を行った。その結果、ドローンの飛行速度が高いほど空間解像度が向上し、地形の詳細な識別が容易になることが実証された。解像度とドローン飛行速度の関係性は、実験で取得されたドローンの軌道誤差を組み込んだ場合における点ターゲットからの反射を仮定するシミュレーションを行い、整合する結果が得られた。本研究は、ドローン SAR が衛星 SAR では観測が困難な地形やタイミングにおいて、機動的な地表変動モニタリングやリスク評価のための貴重なツールである可能性を示した。

最後に、第 6 章では結論として、本研究の内容に関するまとめを述べた。

本研究は、将来的に衛星 InSAR 解析とドローン SAR データの解析が統合的に利用されることを想定し、地表変動モニタリングへの適用と手法開発をそれぞれ行った。衛星とドローンの両プラットフォームの特性は異なるため、相互補完的に利用することが望ましい。特に、衛星 InSAR 解析は地震などによる長期間の地表変動をモニタリングするために有効な手法であるため、衛星 SAR データでは取得が困難な 3 次元方向の地表変動データの取得など、衛星 SAR の短所を補うようなドローン SAR の利用が重要と考えている。本研究の成果は、地震や火山活動による地表変動の推定といった防災学分野への応用にとどまらず、CCS (Carbon Capture Storage) などの資源工学や都市インフラ施設の変形計測などの土木工学といった他分野への波及効果が期待される。

(論文審査の結果の要旨)

合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar; SAR) の強度画像の解析および干渉 SAR (Interferometric SAR; InSAR) 解析は、高い空間分解能で広域の地表変動の経時変化を観測できる有力なリモートセンシング手法の一つである。本博士論文では、まず衛星 InSAR 解析を用いて 2018 年に発生した大阪北部地震の前後における京阪神地域の地表変動の高精度推定とそのメカニズムの解明に取り組んだ。次に、衛星 SAR データを補完するために、機動性の高いドローンに SAR を搭載したドローン SAR システムの開発、観測および解析を実施した。得られた成果は次の 3 つに要約される。

- (1) 大阪北部地震が発生した 2018 年を跨ぐ 2015~2020 年における京阪神地域の地表変動を衛星 SAR データを用いて解析した結果、地震前後における準鉛直方向と準東西方向の地表変動のパターンを明らかにできた。また、GNSS データと比較することで、実施した解析の手法と結果の妥当性を検討し、PSInSAR 解析による地表変動の推定は高い精度であることが実証された。
- (2) 大阪北部地震の前後において、それぞれの長期的な地表変動傾向の変化を推定し、地下水位変化データと比較することによってそれらの相関関係は地震発生前後で変化したことを明らかにした。これらに基づき、Mw 6 クラスの地震によるダメージは広範囲にわたって、帯水層の水理的性質の変化を引き起こす可能性を初めて確認することができた。これに加えて、大阪北部地震に伴う地表変動傾向変化のメカニズムを説明する帯水層の力学モデルを新たに提案した。
- (3) 露天掘り鉱山の斜面と活火山の火口でドローン SAR 観測を実施し、ドローン飛行速度とレーダ照射角が SAR 強度画像の解像度や反射の強さにどのように影響を及ぼすかについて検討を行った結果、ドローン飛行速度が高いほど画像の解像度が向上し、地形の詳細の識別が容易になることが判明した。この特徴は軌道誤差を考慮した SAR データに関する数値シミュレーションによっても確認された。

以上、本研究では衛星 InSAR 解析により大阪北部地震前後の地表変動に関する研究を行い、地表変動と地下水帯水層との関連性に関する重要な発見をしたほか、ドローン SAR 観測の基本的な特性に関する知見を得ている。これらの新知見は地震学と水理学の学際的な分野において学術的な意義が大きく、かつ、防災工学、資源工学、土木工学などの分野への波及効果が期待される。本論文は、これらの地球科学と地球工学の分野において、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 2 月 20 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。