

干渉 SAR と SfM-MVS 技術による地震に伴う谷埋め盛土造成地の変動の検出と評価

中埜 貴元¹・藤原 智¹・小林 知勝¹

Detection and evaluation of earthquake-induced deformation of reclaimed valleys using synthetic aperture radar interferometry, Structure from Motion and Multi-view Stereo technology

Takayuki NAKANO¹, Satoshi FUJIWARA¹ and Tomokazu KOBAYASHI¹

Abstract

Reclaimed valleys may become deformed during large earthquakes. Therefore, in this study, we examined the validity of the method for extracting the deformed area of the reclaimed valleys where shifts in the landforms occurred during the 2016 Kumamoto and 2018 Hokkaido Eastern Iwate earthquakes. The deformation was detected by interferometric synthetic aperture radar (InSAR), and the validity of the findings were determined by comparing the results of field surveys and distribution maps of the reclaimed valleys that were created using the Structure from Motion and Multi-view Stereo (SfM-MVS) technique. Results showed that in the case of small incident angle of the radio wave, the sites detected as localized phase change areas or non-interference areas in the SAR interferograms were consistent with the area of the actual deformation in the reclaimed valleys, indicating the effectiveness of interferometric SAR during disaster response after an earthquake at detecting reclaimed valley deformation. At one site in a reclaimed valley, the degree of change in elevation could be estimated from the difference in the digital surface models generated by SfM-MVS technique from aerial photographs taken before and after the earthquake.

キーワード：干渉 SAR, SfM-MVS, 地震, 谷埋め盛土, 滑動の変動

Key words: SAR interferometry, SfM-MVS, earthquake, reclaimed valley, sliding type deformation

1. はじめに

地震に伴う都市域の地盤災害の一つとして、宅地盛土造成地の滑動崩落現象が挙げられる。宅地

盛土造成地は、宅地用地の確保のために丘陵地等で尾根を削り、それにより生産された土砂で谷を埋めることで造られた土地であり、特に谷を埋め

¹ 国土地理院
Geospatial Information Authority of Japan

た箇所（谷埋め盛土）では地震や豪雨に伴い原地盤をすべり面とする盛土土塊の滑動崩落が発生することがある。崩落までは至らずとも盛土土塊が一体的に変動する場合（滑動的変動）においても、道路や地下埋設物の破損、不同沈下、家屋等の傾倒が生じ、被害は大きい。これまでに1978年宮城県沖地震、平成7年（1995年）兵庫県南部地震、平成16年（2004年）新潟県中越地震、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震（以下、「東北地方太平洋沖地震」という）等でこのような現象が発生しており（釜井・守随，2002；釜井，2005；清田・京川，2011など）、平成28年（2016年）熊本地震（以下、「熊本地震」という）でも熊本市内や御船町内で発生した（上村，2017；橋本・他，2017）。また、平成30年北海道胆振東部地震（以下、「北海道胆振東部地震」という）では、札幌市清田区において火山灰質土を用いた谷埋め盛土における液状化やそれに引き続く盛土材の流出現象が、さらに厚真町では谷埋め盛土の滑動崩落現象が発生した（地盤工学会・土木学会，2018；飯場・永井，2018；など）。

この宅地盛土造成地の滑動崩落や滑動的変動の運動様式は、基本的には自然斜面における地すべり運動と同類である。自然斜面においては、地震に伴う地すべり崩落や崩落までには至らない重力性の斜面変動が発生する（宇根・他，2008など）。この自然斜面における地震時の重力性斜面変動は、現地に設置された伸縮計、ひずみ計、GNSSなどの観測センサーで直接観測される（岡本・他，2006；中里・他，2006；中村・他，2011）ほか、干渉合成開口レーダ（干渉 SAR）のようなりモートセンシング技術により検出できることがこれまでに数多く報告されている（宇根・他，2008；佐藤・他，2014；Sato & Une，2016；森下・他，2015；清澤・佐藤，2020など）。一方で、宅地盛土造成地の地震時滑動的変動の干渉 SAR による検出事例は、これまでほとんど報告されてこなかった。

SAR 干渉画像において、自然斜面における重力性斜面変動域は、局所的な位相変化またはノイズ様の非干渉領域として検出されることが多い。干渉 SAR で捉えられる重力性斜面変動の空間サ

イズは干渉性や変位パターンによって数10 m のサイズが検出できることもあれば、数100 m の大きさがないと検出できないこともある。東北地方太平洋沖地震では仙台市を中心に多数の宅地盛土造成地の滑動的変動が生じ（清田・京川，2011；沖村・他，2011；佐藤・中埜，2011；若松・他，2011など）、中には変動ブロックの長辺が250 m 程度に及ぶような盛土も存在したが、本地震は地殻変動量が広域にわたって大きく、局所的な変動の検出に適した干渉 SAR 解析が行われなかったことや、SAR (ALOS) の解像度が不十分だったことにより、SAR 干渉画像において宅地盛土造成地の滑動的変動を示す位相変化は確認されなかったと考えられる。

一方、国土地理院が JAXA の ALOS-2 データを用いて解析した熊本地震における SAR 干渉画像（国土地理院，2016；上芝・他，2016）においては、宅地盛土造成地において広域の地殻変動を示す位相変化の中に、150～200 m 四方程度の広がりをもつパッチ状の非干渉領域が現れ、局所的な地盤変動を示すと考えられた（中埜・他，2017；Nakano et al., 2019）。ただし、これらの事例においては、現地を確認された地表変形との対応関係や実際に盛土土塊（地表）がどのように変動したのかの検討は十分に行われていなかった。熊本地震以外では、北海道胆振東部地震時の SAR 干渉画像（国土地理院，2018；本田・他，2019）においても、液状化等を起因とする谷埋め盛土造成地の流動被害が生じた地域ではノイズ様の非干渉領域が現れ、その周辺の谷埋め盛土造成地においては樹枝状に衛星から遠ざかる変動を示す位相変化が確認された（Fujiwara et al., 2019）。これらの地点では、現地において地表変形が確認された（宮崎・他，2018；横田・他，2019）が、両者の対応関係の検討は網羅的には実施されていなかった。

このような現象のメカニズムの検討・評価のためには、干渉 SAR 等で変動域や変動量を把握するとともに、盛土の空間分布と形状（厚さ、地山傾斜角等）も把握する必要がある。大規模盛土造成地の位置と規模の把握手法については、国土交通省（2015）の「大規模盛土造成地の滑動崩落対

策推進ガイドライン及び同解説」に示されているように、造成前と造成後の地形データ (DEM) の差分を取る手法が一般的である。しかし、造成前の DEM を入手あるいは作成することは容易ではないケースが多い。一般的に、造成前の地形データは、造成前の空中写真を用いた写真測量による図化、あるいは造成前に作成された旧版地形図の等高線のマップデジタル化等で作成されるが、写真測量は時間とコストがかかり、旧版地形図は大都市圏を除いて作成されていない地域が多い。そのような中、近年発展のめざましい SfM ステレオ写真測量 (Structure from Motion: SfM 及び Multi-View Stereo: MVS; SfM-MVS) 技術を用いて造成前の空中写真から当時の Digital Surface Model (DSM) を作成し、フィルタリング処理により疑似的な DEM として用いることで、精度は劣るものの、盛土分布の概略を迅速に把握することが可能となってきた (Fujiwara et al., 2019; Nakano et al., 2019)。さらに、イベント前後の空撮写真から SfM-MVS 技術によりそれぞれの時点の詳細な DSM を作成し、両者の差分を取ることで、イベント前後の地表変位量を把握することも可能となっている (Derrien et al., 2015; 石黒・他, 2016; Saito et al., 2018; 内山・須貝, 2019 など)。これは、干渉 SAR により変動量が識別できない場合等に有効と考えられる。ただし、これらの事例は主に小型無人航空機 (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) を用いた低空飛行による空撮画像を用いたものであり、航空機等のプラットフォームにより高高度から撮影された空中写真を用いてイベント前後の地表変位を検出した事例は Derrien et al. (2015) に限られるうえ、地震に伴う宅地盛土造成地の変動を対象とした事例は確認できていない。

これらの技術を活用することで、大規模な地震に伴い滑動の変動が発生した宅地盛土の広域的な分布や盛土形状を、地震後に迅速に把握することができると考えられる。また、地震前の空中写真があり、地震後にも空中写真が撮影されれば、それらの滑動の変動盛土の地表変位量を面的に把握できる可能性がある。そこで本研究では、主に地

震後の災害対応等での利用を想定し、広域の被災域における宅地盛土変動被害の迅速な抽出への適用性検討を目的とし、熊本地震と北海道胆振東部地震での事例を対象に、(1) SAR 干渉画像を用いた既往研究では報告されていない地点も含む宅地盛土の滑動の変動箇所の抽出、(2) 抽出された変動箇所における造成前後の空中写真と SfM-MVS 技術を活用した盛土分布の把握、(3) 地震後の現地調査により確認した地表変形箇所と上記 (1)、(2) の比較による、干渉 SAR による宅地盛土の滑動の変動箇所の検出の妥当性と SfM-MVS 技術を活用した盛土分布との対応関係の検討を実施した。併せて、条件の揃った熊本地震については、地震前後の空中写真から SfM-MVS 技術により作成した DSM の比較により、局所的な地表変位 (標高変化) の様態を明らかにすることで、干渉 SAR では検出できなかった滑動の変動量の評価も試みた。

2. 対象地震と利用技術の概要

2.1 熊本地震における地盤災害の概要

2016年4月16日に発生した Mj 7.3の地震を本震とする熊本地震では、家屋倒壊や斜面崩壊など、甚大な被害が生じた。この地震に伴う地盤災害としては、旧阿蘇大橋を落橋させた阿蘇カルデラ斜面の大規模崩壊に代表される多くの土砂移動現象 (国土交通省, 2016) や、既知の布田川断層及び日奈久断層に沿って出現した地表地震断層 (Shirahama et al., 2016 など) によるインフラ等の被害、熊本平野から阿蘇カルデラ内の阿蘇谷にかけて広域で発生した液状化被害 (若松ほか, 2017) などが注目を集めたが、局所的には本研究で取り上げる宅地盛土造成地の滑動崩落または滑動の変動が生じた (上村, 2017; 橋本・他, 2017)。主な宅地盛土被害は、熊本市や御船町、宇土市、益城町等で発生したが、我々の現地調査では大津町でも確認している。

また、本研究で利用した干渉 SAR 技術により、広域にわたる地殻変動の全容が明瞭に捉えられた (国土地理院, 2016) とともに、ローカルな地表変位を示す多数の位相変化も捉えられた

(Fujiwara et al., 2016; Fujiwara et al., 2017; Nakano et al., 2019; Fujiwara et al., 2020 など)。これらのローカルな位相変化は、地震に伴い出現した地表地震断層のようにテクトニックな応力場の変化によって発生する断層運動に伴うもののほか、地震動により発生する液状化に伴う沈下や側方流動、自然斜面の重力性変動といったノンテクトニックな地表変位を示すものもあった。これらの位相変化が現れた地点では、実際に道路等のインフラや耕作地等に地盤被害が生じた。

2.2 北海道胆振東部地震における地盤災害の概要

2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震 (Mj 6.7) においては、厚真町、安平町、むかわ町を中心とする山間地や丘陵地において斜面崩壊や地すべりが多発し、甚大な被害が生じた (砂防学会, 2018; 「地震による地すべり災害」刊行委員会編, 2020 など)。併せて、札幌市清田区を中心とした谷埋め盛土造成地においても液状化等を要因とする盛土の流動現象が生じ、宅地や社会インフラに甚大な被害が生じた (地盤工学会・土木学会, 2018 など)。厚真町や安平町でも谷埋め盛土造成地の滑動崩落現象が発生し (飯場・永井, 2018; 坪山・他, 2020; 黒沢・大橋, 2020; 倉橋・青木, 2020)、家屋やインフラに被害が生じた。これらの土砂移動現象の多くには、広域の地形・地質の他に、当該地域に広く分布する火山灰質土 (テフラ) 及びそれを用いた人工地盤が深く関与していることが指摘されている (廣瀬・他, 2018; 廣瀬, 2020; 田近・他, 2020 など)。

このほか、札幌市北区・東区や北広島市、苫小牧市 (苫小牧港)、厚真町、むかわ町などにおいて液状化被害が報告されている (地盤工学会・土木学会, 2018; 廣瀬・他, 2018 など)。

2.3 干渉 SAR 技術の概要と特徴

干渉 SAR は、衛星等のプラットフォームに搭載された SAR センサーにより同じ場所を異なる時期に撮影した 2 枚の SAR 画像を用いて、画像内の対応する各画素の電波の位相差をとる (干渉

させる) ことにより、地表の変位 (センサーアンテナ-地表間の距離変化量) を捉える手法である (Hanssen, 2001)。地震を対象とした場合、地震前後にそれぞれ撮影された SAR 画像を用いて解析することにより、地震に伴う地面の動きを捉えることができる。

衛星に搭載された SAR は、天候に左右されず夜間でも広範囲 (数 10 km ~ 数 100 km の範囲) を一度に観測することができ、地上に観測機器の設置が不要な点が長所である。2 枚の SAR 画像を用いる干渉 SAR も同様の長所をもつ。一方で、干渉 SAR は GNSS のような連続観測はできず、観測時期は衛星の回帰周期に限定される (ALOS-2 の回帰周期は 14 日)。また、干渉 SAR により得られる変動量は衛星と地表間の電波照射方向の一次元のみであり、通常はその絶対値を得ることはできない。さらに、衛星の進行方向 (ほぼ南北方向) の変動は検出できない。

SAR 画像の空間分解能 (地上画素寸法) は SAR 衛星によって様々であるが、本研究で使用した ALOS-2 の場合は高分解能モードで 3 m または 6 m、広域観測モードで 100 m である。干渉 SAR では、ノイズ低減のためにマルチルック処理が施されるため、SAR 干渉画像の空間分解能 (干渉画像画素寸法) は、一般的に、元の SAR 画像の地上画素寸法よりも数倍大きくなる。本研究で用いた高分解能モード (3 m) の場合の干渉画像画素寸法は、約 11 m となる。さらに、ある広がりをもった変動域を識別するためには、この 11 m 四方のピクセルがある程度まとまって系統的に変化している必要があり、有意な変動として識別可能な変動域の広がり、概ね 100 m 四方以上となる。また、検出できる変動量の下限値は概ね 3 cm である。

干渉 SAR による地震に伴う斜面変動や地盤の側方移動の検出事例は、先述のとおり多数報告されているが、宅地盛土造成地の滑動崩落や滑動の変動を対象とした事例は、宮崎・他 (2018) や Fujiwara et al. (2019)、橋本 (2019) による報告程度である。

2.4 SfM-MVS 技術の概要と特徴

SfM-MVS は、SfM (Structure from Motion) と MVS (Multi-view Stereo) という 2 つの技術から成る写真測量技術である。SfM は、ある対象物をカメラの視点を変えながら撮影した複数枚の画像から、その対象物の三次元形状とカメラの位置を同時に復元する手法である (Snavely et al., 2007; 満上, 2011 など)。この SfM の結果から高密度な三次元形状を復元する手法が Multi-view Stereo 技術である (Furukawa and Ponce, 2010 など)。

SfM-MVS は、フリーソフトウェアや安価で使いやすい有償のソフトウェアにより、大半の処理を自動的に行うことができる点が利点である。また、これらのソフトウェアでは、三次元形状 (三次元モデル) を復元後に、オルソモザイク画像や三次元地形モデル (デジタル標高モデル: DEM) を生成でき、その地上画素寸法は使用する画像の解像度レベルに匹敵する。近年普及が目覚ましい小型無人航空機 (UAV) による低空空撮画像を用いれば、センチメートルオーダーの解像度のオルソモザイク画像や DEM の生成も可能である。

一方で、これらの精度は画像 (写真) の撮影条件や処理に使用する地上基準点 (Ground Control Point: GCP) の計測精度に大きく依存し、それらの精度を超える成果を得ることはできない。また、画像に写っている地物の表面のみが三次元モデル化されるため、空撮画像から得られる DEM は基本的にデジタル表層モデル (Digital Surface Model: DSM) であり、アスファルト面や裸地以外の部分ではフィルタリング処理を施さない限り、デジタル地形モデル (Digital Terrain Model: DTM) を得ることはできない。これは、従来の DTM 取得手法である航空レーザ計測の場合も同様であるが、航空レーザは光が進入できる樹林下のデータが得られるのに対し、SfM-MVS では基本的に取得できず、山林域などではフィルタリング処理を実施しても DTM を得ることは難しい。

早川・他 (2016) にまとめられているように、近年、SfM-MVS 技術は地球科学や地形学の分野で地形及びその変化の計測手法として広く用いられている。一方で、航空機等のプラットフォーム

により高高度から撮影された空中写真を用いた事例 (Derrien et al., 2015; Gomez et al., 2015; Nakano et al., 2019; 川又・他, 2021) はそれほど多くなく、宅地盛土造成地を対象とした事例は Fujiwara et al. (2019) と Nakano et al. (2019) に限られる。

3. 研究対象地域と研究手法

研究対象地域を図 1 に示す。熊本地震に関連した対象地区は、熊本市龍田地区と大津町つつじ台地区、北海道胆振東部地震に関連した対象地区は、札幌市清田区里塚地区と同清田地区である。研究手法を以下に示す。

3.1 SAR 干渉画像の判読による盛土造成地の滑動的変動箇所の抽出

各地震のケースにおいて、盛土造成地の滑動的変動箇所の抽出に用いた SAR 干渉画像群の仕様を表 1 に示す。これらの干渉画像を目視で判読し、何らかの局所的な変動を示す位相変化または非干渉領域を抽出した。

3.2 SfM-MVS 技術を活用した盛土分布図の作成

上記 3.1 で抽出した地域において、SfM-MVS 技術と造成前の空中写真 (表 2) を用いて、造成前の DSM を作成し、フィルタリング処理 (一定の検索範囲内の最小値を取得する処理) とリサンプリング処理により疑似的な DEM を作成した後、基盤地図情報 5 m メッシュ標高データから得た造成後の DEM と差分を取ることで、盛土分布図を作成した。造成前の DSM はいずれも 0.5 m メッシュで作成し、フィルタリング処理後に 5 m メッシュにリサンプリングした。

SfM-MVS 処理には、Agisoft 社製 Metashape Professional を用いた。SfM 処理における主な設定値及び処理後の基準点 (GCP) 残差を表 3 に示す。造成前と造成後の時期では測地座標が異なるが、盛土分布の抽出においては同一地点の標高変化量を計算する必要があるため、造成前のデータの測地座標は造成後の測地座標 (JGD2011) と

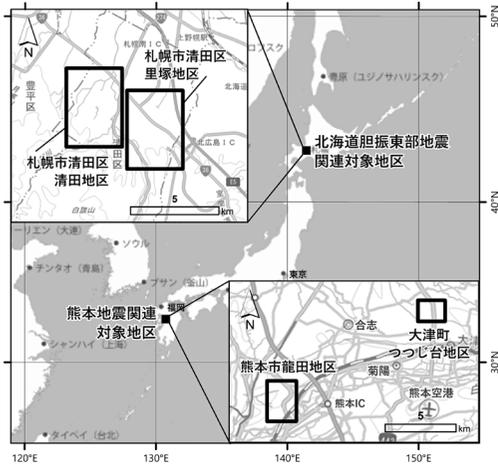


図1 研究対象地区

同一とした。また、SfM 処理においては基本的に複数点の地上基準点 (GCP) を設置する。その GCP の位置座標はできるだけ正確である必要があるが、現地での測量は時間とコストがかかる。そこで本研究では、国土地理院の「地理院地図」の標準地図や年代別の写真レイヤを利用し、造成前後で変化していないと推定される目標地物を選定し、造成後の目標地物の位置座標及び標高を地理院地図上で計測した。そのため、生成される DSM の位置精度は、地理院地図上での標準地図及び年代別の写真レイヤの位置精度以下となる。作成した DSM について、検証点を用いた精度検証は実施していないが、表 3 に示したとおり、基準点 (GCP) 残差の高さ (Z) 成分と 3 次元成分の RMSE は、熊本市龍田地区でそれぞれ約 0.02 m, 0.12 m, 大津町つつじ台地区でそれぞれ約 0.02 m, 0.18 m, 札幌市清田区でそれぞれ約 0.20 m, 0.66

表 1 盛土造成地の滑動的変動箇所抽出に用いた SAR 干渉画像群の仕様

熊本地震							盛土造成地の変動 検出の可否 熊本市/大津町
ペア No.	地震前観測日	地震後観測日	衛星進行方向	電波照射方向	入射角 [度]	垂直基線長 [m]	
K1	2016.3.7	2016.4.18	南行	右	36.3	-124	○/○
K2	2015.2.10	2016.4.19	北行	右	65.9	54	×/×
K3	2016.1.26	2016.4.19	北行	左	43.6	-186	×/×
K4	2015.1.14	2016.4.20	南行	左	43.0	-3	×/×
K5	2016.3.30	2016.4.27	北行	右	43.0	-228	○/×
K6	2016.4.15	2016.4.29	南行	左	32.5	-152	○/○
K7	2016.4.15	2016.4.29	北行	左	24.5	195	○/○
北海道胆振東部地震							盛土造成地の変動 検出の可否
ペア No.	地震前観測日	地震後観測日	衛星進行方向	電波照射方向	入射角 [度]	垂直基線長 [m]	
H1	2018.8.23	2018.9.6	北行	左	43.0	41	○

表 2 SfM-MVS 技術を活用した造成前 DEM の作成に使用した空中写真

地区名	撮影年月日	写真番号等	枚数	撮影高度 [m]	撮影縮尺	カラー種別
熊本市 龍田地区	1967.7.29	MKU676X-C6A-11~13	7	3400	20000	モノクロ
		MKU676X-C7-8~11				
大津町 つつじ台地区	1975.2.26	CKU7422-C40-46~50	18	1450	8000	カラー
		CKU7422-C41-41~46				
		CKU7422-C42-39~45				
札幌市清田区	1961.5.14	MHO613A-C21-5820~5822	44	1800	10000	モノクロ
		MHO613A-C22-7838~7847				
		MHO613A-C23-7808~7818				
		MHO613A-C24-7862~7872				

mであった。この基準点残差のRMSEはあくまでGCPにおける誤差を表したもので、DSM全体の誤差を表したのではなく、全体の誤差はもっと大きな値となっていると考えられる。

なお、熊本市龍田地区を含む熊本市の盛土分布図(熊本市大規模盛土造成地マップ)は、熊本地震後の2019年3月に熊本市により写真測量の成果に基づいて作成・公表されている。また、札幌市清田区における盛土分布図は、北海道胆振東部地震発生前の2017年3月に札幌市により写真測量の成果に基づいて作成・公表されているほか、主な被害箇所周辺においては、旧版地形図をベースとしたデータに基づいた盛土分布図が、地盤工学会・土木学会(2018)やKonagai et al. (2018)などで公表されている。その他、滑動崩落現象が発生した厚真町の盛土分布図も、坪山・他(2020)により旧版地形図ベースで作成されているが、SfM-MVS技術を活用した盛土分布図の作成事例は、Fujiwara et al. (2019)やNakano et al. (2019)など、わずかである。

3.3 現地調査結果との比較

上記3.1で抽出した局所の変動箇所と、上記3.2で作成した盛土分布図及び現地調査により確認し

た地表変形箇所とを比較し、3.1で抽出した局所の変動範囲の妥当性を検討した。

現地調査は、熊本市龍田地区は2016年5月11日及び2017年1月20日、大津町つつじ台地区は2017年1月19日、札幌市清田区は2019年7月4日に実施した。現地調査では、地表変形の有無や変形量の計測を実施した。なお、札幌市清田区については、調査時期が地震発生から10か月後ということもあり、補修作業が進んでいたことから、地震後まもなく調査された、地盤工学会・土木学会(2018)、青山(2018)、パスコ(2018)の調査結果も利用した。

3.4 地震前後の局所的地表変位量の推定

熊本地震のケースについては、地震前後の空中写真(表4)を用いて、SfM-MVS処理により詳細なDSMを作成し、両者を比較することで地震前後の局所的な標高変化量の推定を試みた。DEMではなくDSMを用いたのは、DEMを生成するためのフィルタリングが十分に行われなかった場合の影響の方が大きいと考えたためである。ここでは、盛土造成地における局所的な変位量を抽出するため、地震に伴う広域の地殻変動を除外する必要がある。そこで、SfM処理においては、地震

表3 造成前DEM作成時のSfM処理における主な設定値及び処理後の基準点(GCP)残差

地区名		熊本市 龍田地区	大津町 つつじ台地区	札幌市 清田区
座標系		JGD2011		
GCP数		14	20	37
Alignment	精度	最高		高
高密度ポイントクラウド	品質	最高		高
	フィルタ	強		
DEM生成	ソースデータ	高密度クラウド		
	内挿補間	有効		
	メッシュサイズ[m]	0.5		
オルソモザイク生成	サーフェイス	DEM		
	穴埋め	有効		
	ピクセルサイズ[m]	0.2		
GCP残差(RMSE)[m]	X	0.04	0.15	1.12
	Y	0.12	0.08	0.17
	Z	0.02	0.02	0.20
	合計(3次元)	0.12	0.18	0.66

表 4 SfM を利用した地震前後の局所的な標高変化量の推定に用いた空中写真

地区名		撮影年月日	写真番号等	枚数	撮影高度 [m]	撮影縮尺	カラー種別
熊本市 龍田地区	地震前	2008.5.21	CKU20082-C21-26~30 CKU20082-C22-23~27 CKU20082-C23-22~26 CKU20082-C24-21~26	21	1536	10000	カラー
	地震後	2016.4.16	CKU20168-C09-5~11 CKU20168-C10-5~11 CKU20168-C11-5~11 CKU20168-C12-29~35	28	1646	10000	カラー
大津町 つつじ台地区	地震前	2015.5.5	CKU20152-C2-16~21 CKU20152-C3-16~21	12	2355	10000	カラー
	地震後	2016.4.16	CKU20167-C5-18~21 CKU20167-C6-18~21 CKU20167-C7-18~20	11	3290	10000	カラー

前後の空中写真において可能な限り同一の GCP を使用し、位置座標を地震後に合わせた。それでも生成された地震前後の DSM 間には系統的な位置ずれが生じたため、対象地域の周辺において局所的な地表変位が発生していないと推定される複数地点の位置を、DSM と併せて生成したオルソモザイク画像 (0.2 m 解像度) から選定し、それらの地点を可能な限り一致させるよう、地震前の DSM に対してアフィン変換を実施した。なお、アフィン変換前の系統的な位置ずれは概ね 1 方向のシフト (平行移動) であり、アフィン変換による DSM 値の精度の劣化はほとんどないと考えられる。

SfM 処理における主な設定値及び処理後の基準点 (GCP) 残差を表 5 に示す。ここではいずれも 0.2 m メッシュ DSM を生成した。なお、作成した DSM について、検証点を用いた精度検証は実施していないが、表 5 に示したとおり、基準点 (GCP) 残差の高さ (Z) 成分と 3 次元成分の RMSE は、熊本市龍田地区で地震前がそれぞれ約 0.46 m, 0.58 m, 地震後がそれぞれ約 0.50 m, 1.20 m, 大津町つつじ台地区で地震前がそれぞれ約 0.09 m, 0.57 m, 地震後がそれぞれ 0.06 m, 0.49 m であった。

4. 結果

4.1 熊本地震での事例

(1) 熊本市龍田地区

熊本市龍田地区において、盛土造成地の局所的

な変動を示すと考えられる位相変化または非干渉領域を含む SAR 干渉画像と、同地域で SfM-MVS 処理を活用して作成した盛土分布図を図 2 に示す。図 2 a は対象地域を含む広域の SAR 干渉画像を、図 2 b は対象地域の SAR 干渉画像を、図 2 c は盛土分布図を示す。図 2 c には、図 2 b の SAR 干渉画像上の位相変化または非干渉領域を示す枠線と、現地調査で確認した地表変形箇所を重ねて表示している。局所的な位相変化または非干渉領域は 4 枚の SAR 干渉画像で確認できたが (表 1)、ここでは代表的な 1 枚 (表 1 のペア K6) を図示した。これらの図から、対象地域には広域的な地殻変動を示す干渉縞が現れており、その中に見られる局所的な位相変化または非干渉領域は、実際に地表変形が生じた盛土部で現れていることが分かる。

図 2 c の南東部、龍田陳内二丁目の宅地区画の南東部を拡大したもの及び現地写真を図 3 に示す。図 3 の中央からやや北西の位置に見られる盛土部は、熊本市の大規模盛土造成地マップにおいても谷埋め型盛土として抽出されており、地震後に撮影された空中写真でも開口亀裂が確認できた。現地調査時にはブルーシートで覆われていたが (図 3 写真③)、盛土斜面下部 (東側) の道路脇には斜面の変動を抑止するための土のうが積み重ねられており、盛土部が沈下しつつ南東方向に滑動的に変動して開口亀裂が生じたと推測された。この部分の SAR 干渉画像は局所的な非干渉領域であり、変動方向等の判断はできず、また、盛土の範囲よ

表 5 熊本地震前後の局所的な標高変化量の推定用の DSM 作成時の SfM 処理における主な設定値及び処理後の基準点 (GCP)

地区名	熊本市 龍田地区		大津町 つつじ台地区		
	地震前	地震後	地震前	地震後	
座標系	JGD2011				
GCP 数	16	19	14	20	
Alignment	精度	最高			
高密度ポイントクラウド	品質	最高			
	フィルタ	弱			
DEM 生成	ソースデータ	高密度クラウド			
	内挿補間	有効			
	メッシュサイズ [m]	0.2			
オルソモザイク生成	サーフェイス	DEM			
	穴埋め	有効			
	ピクセルサイズ [m]	0.2			
GCP 残差 (RMSE) [m]	X	0.20	0.45	0.46	0.33
	Y	0.29	0.98	0.32	0.36
	Z	0.46	0.50	0.09	0.06
	合計 (3 次元)	0.58	1.20	0.57	0.49

りもやや広めに現れているが、盛土斜面下部の道路脇に積まれていた土のうの範囲とは整合しており、実際にはこの範囲の斜面ではらみ出しのような変動が発生した可能性がある。図 3 の中央やや南東寄りの区画は盛土領域としてはほとんど抽出されておらず、熊本市の大規模盛土造成地マップでも盛土としては抽出されていないが、地震に伴う大規模盛土造成地滑動崩落防止事業実施箇所として位置づけられており、腹付け盛土となっている可能性がある。この地点ではアスファルト道路面や擁壁面において、開口幅0.5～3 cm 程度の多数の開口亀裂が確認された (図 3 写真①, ②)。SAR 干渉画像は局所的な非干渉領域を示しており、その領域と亀裂の分布域は整合する。SAR 干渉画像からは変動方向は判断できないが、斜面の向きから考えると東向きと考えられる一方で、開口亀裂の走向がほぼ東西方向となっており、南向き成分も存在することが示唆される。

図 2c の中央部付近、龍田三丁目を拡大したもの及び現地写真を図 4 に示す。この区域では図の中央東寄り付近の区画で、北西-南東方向に谷軸をもち、谷止め擁壁を出口とする厚い谷埋め盛土が抽出されている。また、図の中央西寄りの区画にも盛土を示す範囲が抽出されているが、その南

側の丘陵斜面にも盛土が抽出されてしまっており、区別が難しい状況である。この区域は、熊本市の大規模盛土造成地マップでは盛土としては抽出されていないが、地震に伴う大規模盛土造成地滑動崩落防止事業実施箇所として位置づけられており、上村 (2017) では中央西寄りの区画について、新旧地形図の重ね合わせによる定性的な想定盛土範囲と被害の状況が示されている。図の中央東寄り付近の区画では、現地調査によりアスファルト道路や擁壁、家屋基礎の開口亀裂、家屋の損壊 (全壊・半壊判定家屋) を多数確認した (図 4 写真①～③)。現地で確認した主な損壊家屋は、盛土・切土境界部に位置するとともに、道路や家屋基礎の亀裂のほとんどは盛土側が低下する数 cm ～数十 cm の上下変位を伴っていることから、谷埋め盛土は沈下を伴いつつ造成前地形の谷軸に沿って南東方向に向かって滑動的に変動したと考えられる。SAR 干渉画像では、衛星から遠ざかる (沈降または東向き) 変動を示しているようにも見受けられるが、断定は難しい。なお、SAR 干渉画像において谷埋め盛土の末端部 (谷止め擁壁の西側) 付近の変動が確認できないのは、この付近は谷埋め盛土の谷頭部付近からの変動が寄り集まる短縮変形場にあたり、地表に現れる変形量が相対的に

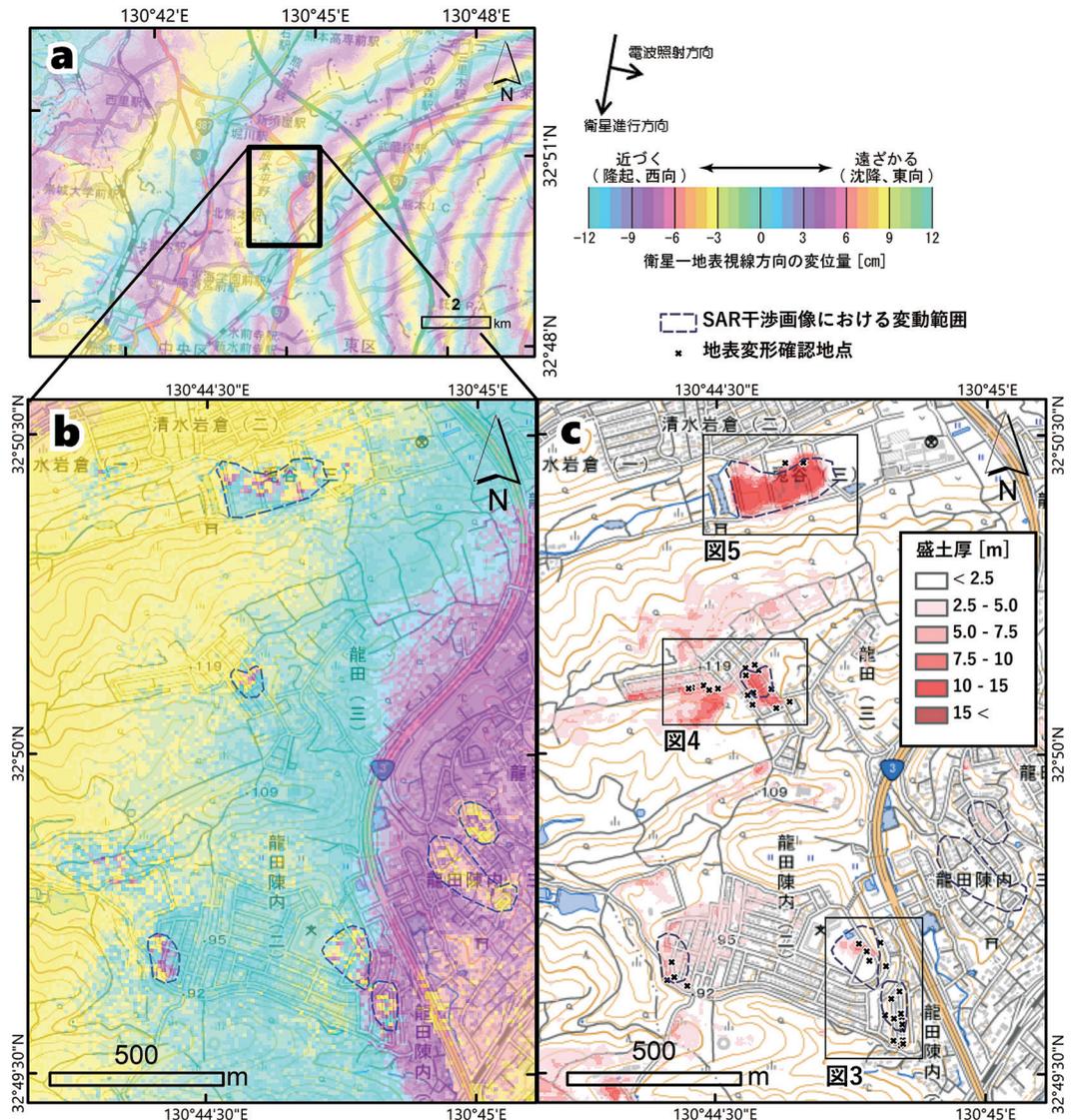


図2 (a) 熊本市龍田地区を含む広域の SAR 干渉画像 (表 1 のペア K6) と (b) 龍田地区の SAR 干渉画像及び (c) 盛土分布図 (背景は「地理院地図」)

小さくなるためと考えられる。中央西寄りの区画は、SAR 干渉画像では変動が検出されていない。現地調査時は工事中で十分な調査ができなかったが、上村 (2017) の報告によれば、腹付け形態に近い谷埋め盛土が、南方向に向かって滑動的に変動したと考えられる。

図 2c の北部、兎谷三丁目を拡大したものと及び現地写真を図 5 に示す。この区画では、東北東-

西南西方向の谷軸をもつ規模の大きな厚い谷埋め盛土が抽出されている。熊本市の大規模盛土造成地マップでもほぼ同じ位置に谷埋め盛土が図示されているが、我々の盛土分布図よりも東側まで盛土が抽出されている。この谷埋め盛土域では、図 2 に示した SAR 干渉画像ではそれほど明瞭ではないが、表 1 の K7 のペアなどにおいて明瞭な位相変化が現れており、衛星-地表間の電波照射方

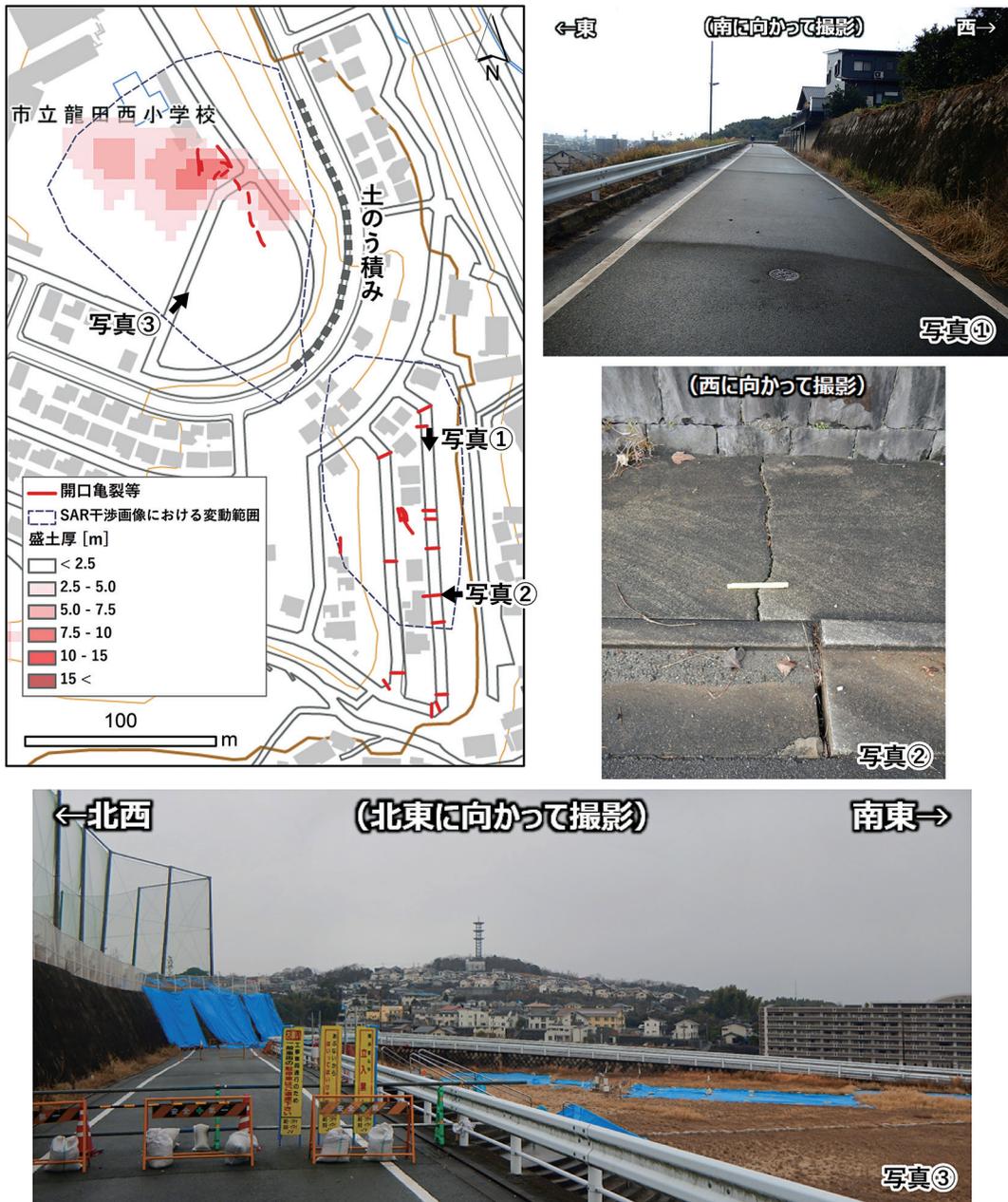


図3 図2cの龍田陳内二丁目の宅地区画の南東部を拡大したものと現地写真。写真①：道路を横断する亀裂群。写真②：道路から擁壁下部へつながる開口亀裂。写真③：開口亀裂が生じて立ち入り禁止となっている状況。亀裂にはブルーシートがかけられている。

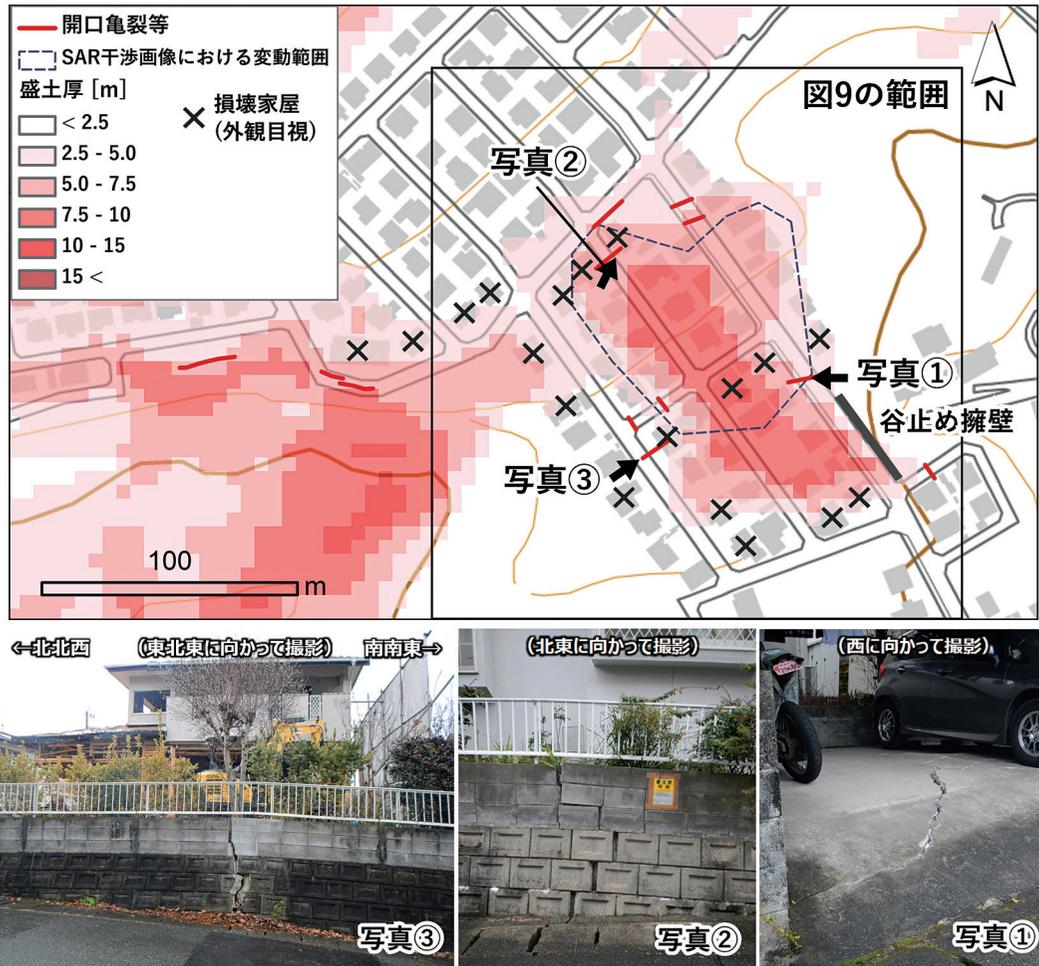


図4 図2cの龍田三丁目を拡大したもの及び現地写真。写真①：住家の駐車場のコンクリート敷き部の開口亀裂。南側が2 cm程度低下。写真②：南東側が低下することで生じた住家周囲の擁壁及びブロック塀の変形。見かけ低下量は最大で10 cm程度。写真③：南東側が低下することで生じた住家周囲の擁壁及びブロック塀の変形。見かけ低下量は最大で20 cm程度。塀の背後の住家も大きな被害を受け、取り壊し中であった。

向で最大5～6 cm程度の衛星から遠ざかる（沈降または西向き）変動が読み取れる。現地調査では、ほぼ南北方向に走るアスファルト道路及びその側溝における南下がり3 cmの上下変位（図5写真①、②）とグラウンドにおける南側沈下を伴う開口亀裂、及び区画南縁に沿ったほぼ東西方向に走る道路の補修痕跡を確認した。いずれの地表変形（及びその痕跡）も谷埋め盛土の境界部に位置し、SAR干渉画像における沈降または西向きの変動も、造成前地形から想定される谷埋め盛土

の変動方向と調和的であることから、谷埋め盛土の滑動の変動が生じたと考えられるが、これら以外には明瞭な地表変形は確認できず、検討の余地が残る。

(2) 大津町つつじ台地区

大津町つつじ台地区を含む広域のSAR干渉画像を図6aに、そのうちの対象地域を拡大したSAR干渉画像を図6bに、盛土分布図を図6cに示す。図6cには、図6bのSAR干渉画像上の位

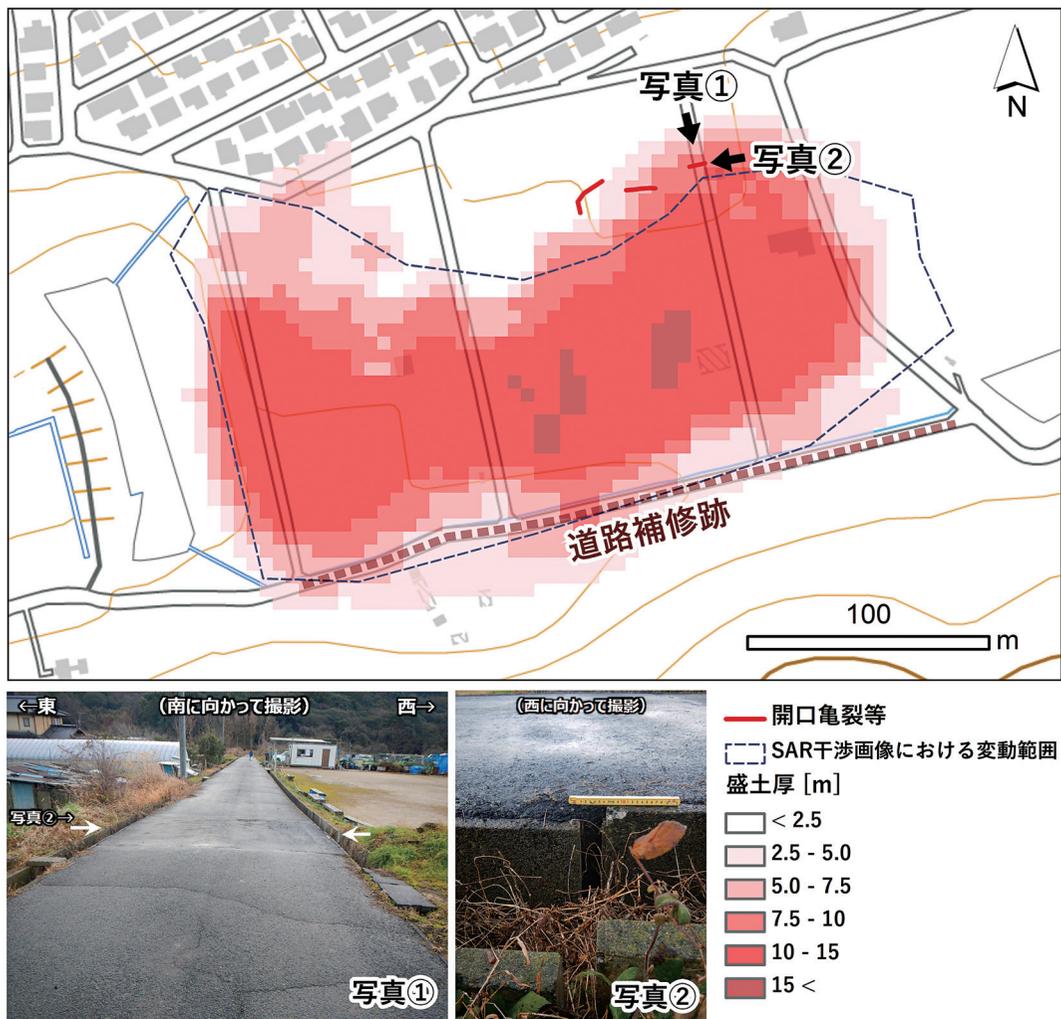


図5 図2cの兎谷三丁目を拡大したもの及び現地写真。写真①：アスファルト道路及びその側溝を横切る南下がり3cmの上下変位の補修痕。写真②：写真①の上下変位を東側から撮影。

相変化領域を示す枠線と、現地調査で確認した地表変形箇所及び家屋状況を重ねて表示している。局所的な位相変化は3枚のSAR干渉画像で確認できたが(表1)、ここでは代表的な1枚(表1のペアK1)を図示した。

この造成地では、東西方向の谷軸をもつ谷埋め盛土と、そこから分岐した北西-南東方向の谷軸をもつ谷埋め盛土が確認できる(図6c)。SAR干渉画像(図6b)における局所的な位相変化領域は、範囲が狭く変動量も小さいことから、その変動量

及び向きは判断は難しいが、衛星から遠ざかる(沈降または西向き)変動を示していると考えられる。その範囲は東西方向の谷軸をもつ谷埋め盛土部に位置し、その縁辺部で実際に地表変形が生じたことが分かる。谷埋め盛土の末端部(造成地西側の谷の出口部分)は背の高い擁壁となっており、集水桝との接合部分が最大8cm西側へはらみ出していた(図6写真①)。宅地部分では谷埋め盛土領域及び位相変化領域の縁辺部でアスファルト道路の開口亀裂(図6写真②)や家屋の損壊・撤去

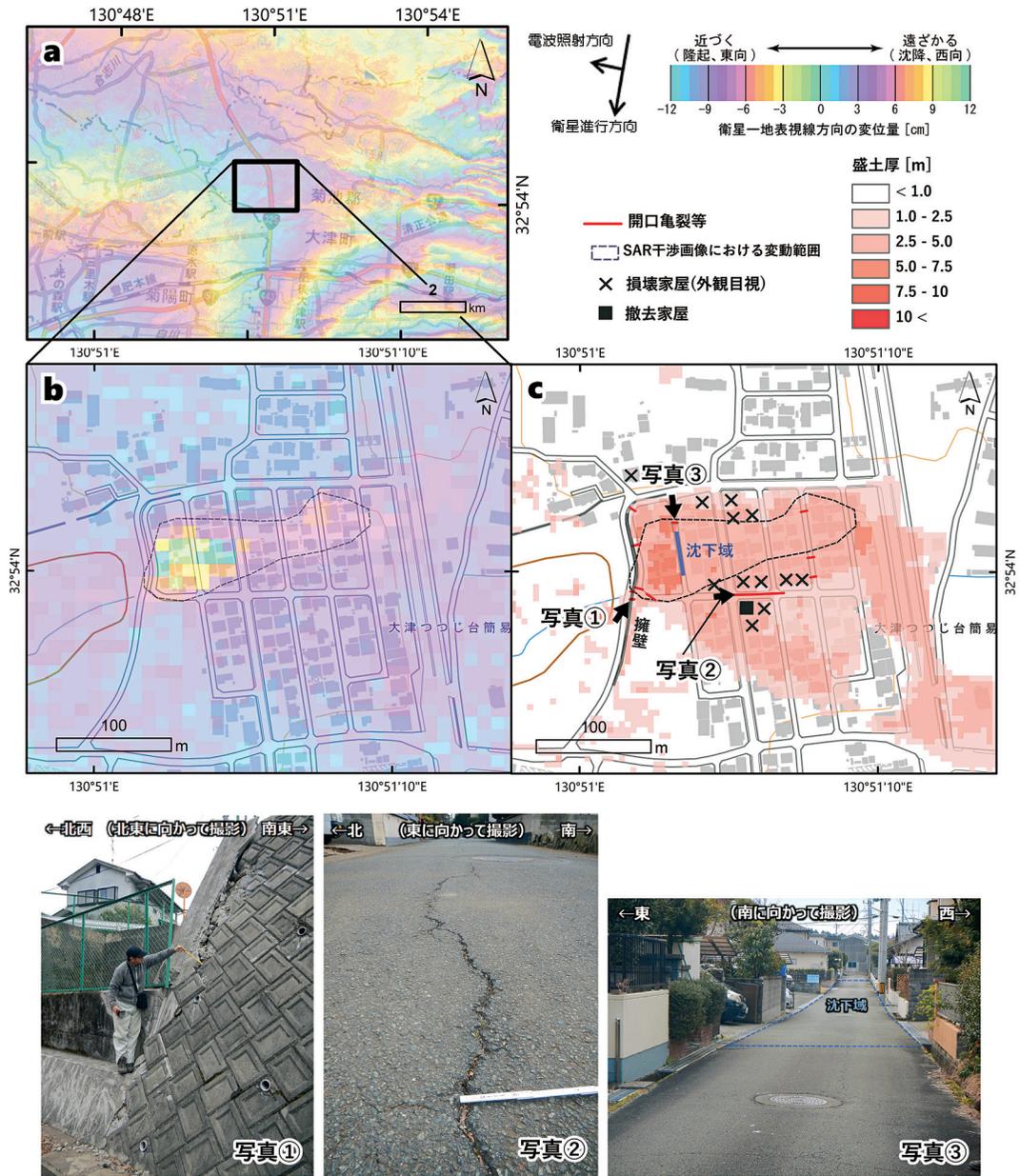


図6 (a) 大津町つつじ台地区を含む広域の SAR 干渉画像 (表 1 のペア K1) と (b) つつじ台地区の SAR 干渉画像及び (c) 盛土分布図 (背景は「地理院地図」)。写真①：谷埋め盛土の末端部 (造成地西側の谷の出口部分) 擁壁と集水樋との接合部における最大 8 cm 西側へのはらみ出し。写真②：宅地内のアスファルト道路の開口亀裂。写真③：熊本地震によるものか経年の圧密沈下によるものか不明な、道路面のわずかな沈下。

が確認された。ただし、道路の開口亀裂の一部は谷埋め盛土部の圧密沈下等により熊本地震前から生じていた可能性もある。また、熊本地震によって生じたものか経年の圧密沈下によるものかは不明であるが、位相変化領域の中心部付近を横切る道路面がわずかに沈下していた(図6写真③)。開口亀裂は上下変位や横ずれを伴っておらず、変位量や向きは識別できないが、地表変形や家屋被害の分布及び造成前地形から、谷埋め盛土は若干の沈下を伴いつつ西方向に変動したと考えられる。この変動様態は SAR 干渉画像から判断される変動と整合する。

4.2 北海道胆振東部地震での事例

(1) 札幌市清田区里塚地区

札幌市清田区里塚地区における SAR 干渉画像と盛土分布図を図7に示す。図7bの盛土分布図には、図7aの SAR 干渉画像上の位相変化領域及び非干渉領域を示す枠線と、現地調査で確認した地表変形箇所及び地盤工学会・土木学会(2018)、青山(2018)、パスコ(2018)による主な地表変形箇所を重ねて表示している。本地区を含む SAR 干渉画像は1枚のみであった。

この地区では、Fujiwara et al. (2019) が指摘したとおり、樹枝状の谷埋め盛土部において SAR 干渉画像の位相変化あるいは非干渉領域が現れている。これらのうち非干渉領域は、Fujiwara et al. (2019) で示された手法と同様、正規化コヒーレンス変化量(地震を挟まない期間の干渉画像のコヒーレンス値を基準とした地震を挟む干渉画像のコヒーレンス値の変化量)を参考に、SAR 干渉画像において面積が概ね1ha以上のノイズ様の範囲を判読することで抽出した。図7bに示すとおり、現地で確認された地表変形箇所等を重ねると、主な変形は盛土領域及び位相変化領域の内部あるいは縁辺部で発生したことが分かる。既往報告では、特に被害の大きかった清田区里塚一条一丁目付近を中心に、清田区美しが丘三条六丁目などで地表変形や家屋被害が確認されていたが、我々の調査により、清田区里塚三条五丁目や里塚霊園においても、盛土領域及び位相変化領域と地

表変形(道路や空地における亀裂、路面の変形等)とが整合していることが確認できた。

現地調査で確認した地表変形の形態からは、変動方向を明確に判断することはできないが、SAR 干渉画像における位相変化領域は、衛星から遠ざかる(沈降または西向き)変動を示しており、造成前地形などから谷埋め盛土部は全体的に沈下したと推察される。なお、特に被害の大きかった清田区里塚一丁目付近の SAR 干渉画像は非干渉領域となっており、地表の変形量が大きかったことと整合する。

(2) 札幌市清田区清田地区

札幌市清田区清田地区における SAR 干渉画像と盛土分布図を図8に示す。図8bの盛土分布図には、図8aの SAR 干渉画像上の位相変化領域を示す枠線と、現地調査で確認した地表変形箇所及び地盤工学会・土木学会(2018)、青山(2018)、パスコ(2018)による主な地表変形箇所を重ねて表示している。SAR 干渉画像は、先述の里塚地区と同じものである。

本地区においても先述の里塚地区と同様に、樹枝状の谷埋め盛土部において SAR 干渉画像の位相変化あるいは非干渉領域が現れている。非干渉領域の抽出基準は、図7と同様である。図8bに示すとおり、現地で確認された地表変形箇所は盛土領域及び位相変化領域の内部あるいは縁辺部で発生したことが分かる。既往報告では、被害の大きかった清田区清田六条二・三丁目付近や清田区清田七条二・三丁目付近で亀裂や陥没、道路の波打ち等の地表変形や家屋被害(傾斜、沈下)が確認されていたが、我々の調査により、清田区清田七条一丁目付近や清田八条二丁目付近においても、盛土領域及び位相変化領域と地表変形(路面の亀裂、陥没、短縮変形等)との整合を確認した。

SAR 干渉画像における位相変化領域は、衛星から遠ざかる(沈降または西向き)変動を示しており(図8a)、造成前地形などから谷埋め盛土部は全体的に沈下したと推察される。造成前地形の谷の出口付近では青山(2018)やパスコ(2018)により短縮変形も確認されており、谷埋め盛土が下

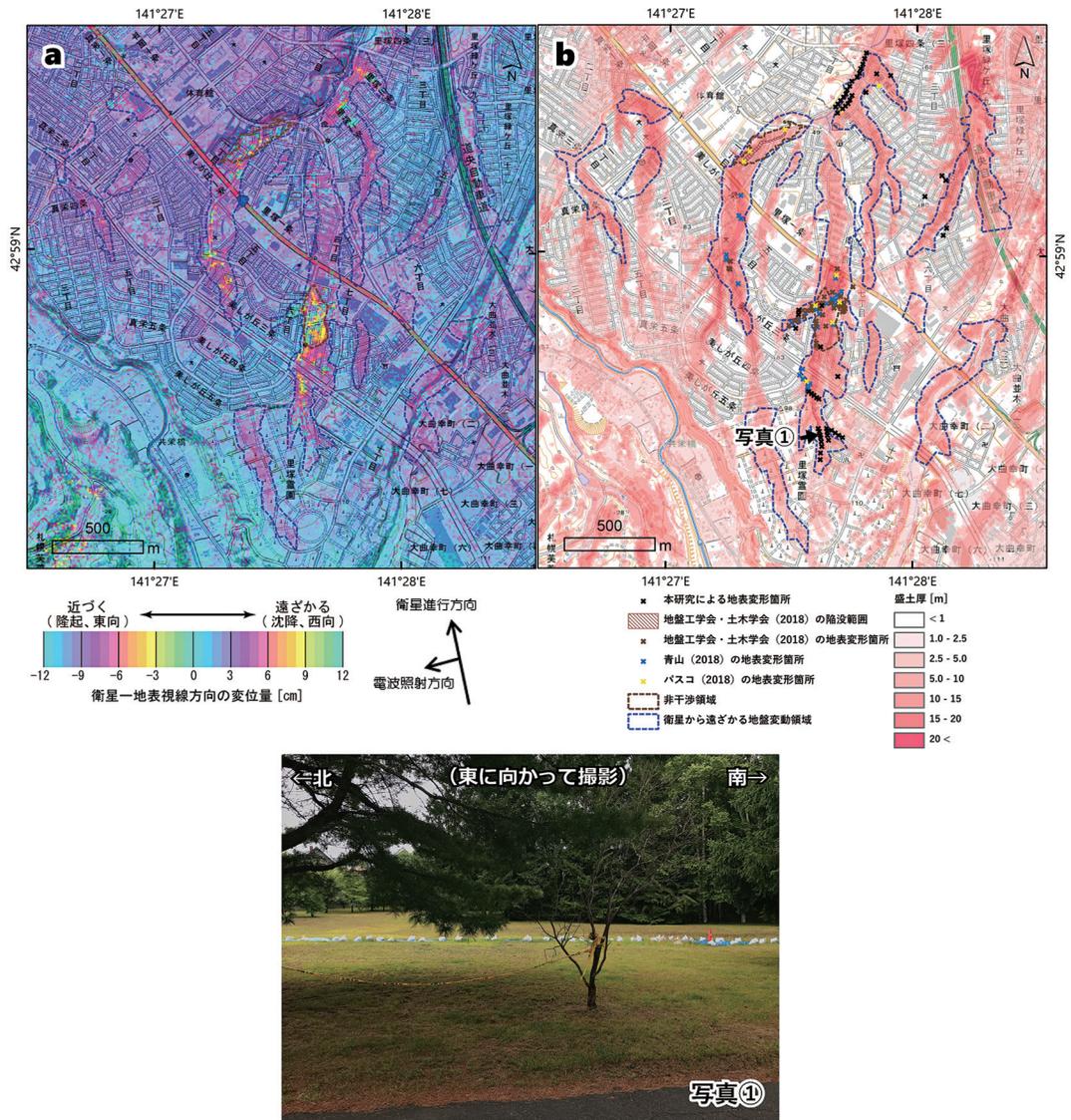


図7 (a)札幌市清田区里塚地区における SAR 干渉画像 (表 1 のペア H1) と (b) 盛土分布図 (背景は「地理院地図」)。写真①：里塚霊園内で確認した芝地の亀裂。土のうが積まれている箇所が亀裂の位置。

流側あるいは谷軸側に向かって変動したことも伺える。なお、被害の大きかった清田区清田六条二・三丁目付近の SAR 干渉画像は非干渉領域となっており、地表の変形量が大きかったことと整合する。

4.3 地震前後の局所的な地表変位量

熊本市龍田地区及び大津町つつじ台地区において、地震前後の空中写真それぞれについて SfM-MVS 処理により詳細な DSM を作成し、両者の差分を取ることで、局所的な標高変化量の推定を試みた。これらのうち、有意と思われる標高変化が抽出できた熊本市龍田地区龍田三丁目 (図 4 の

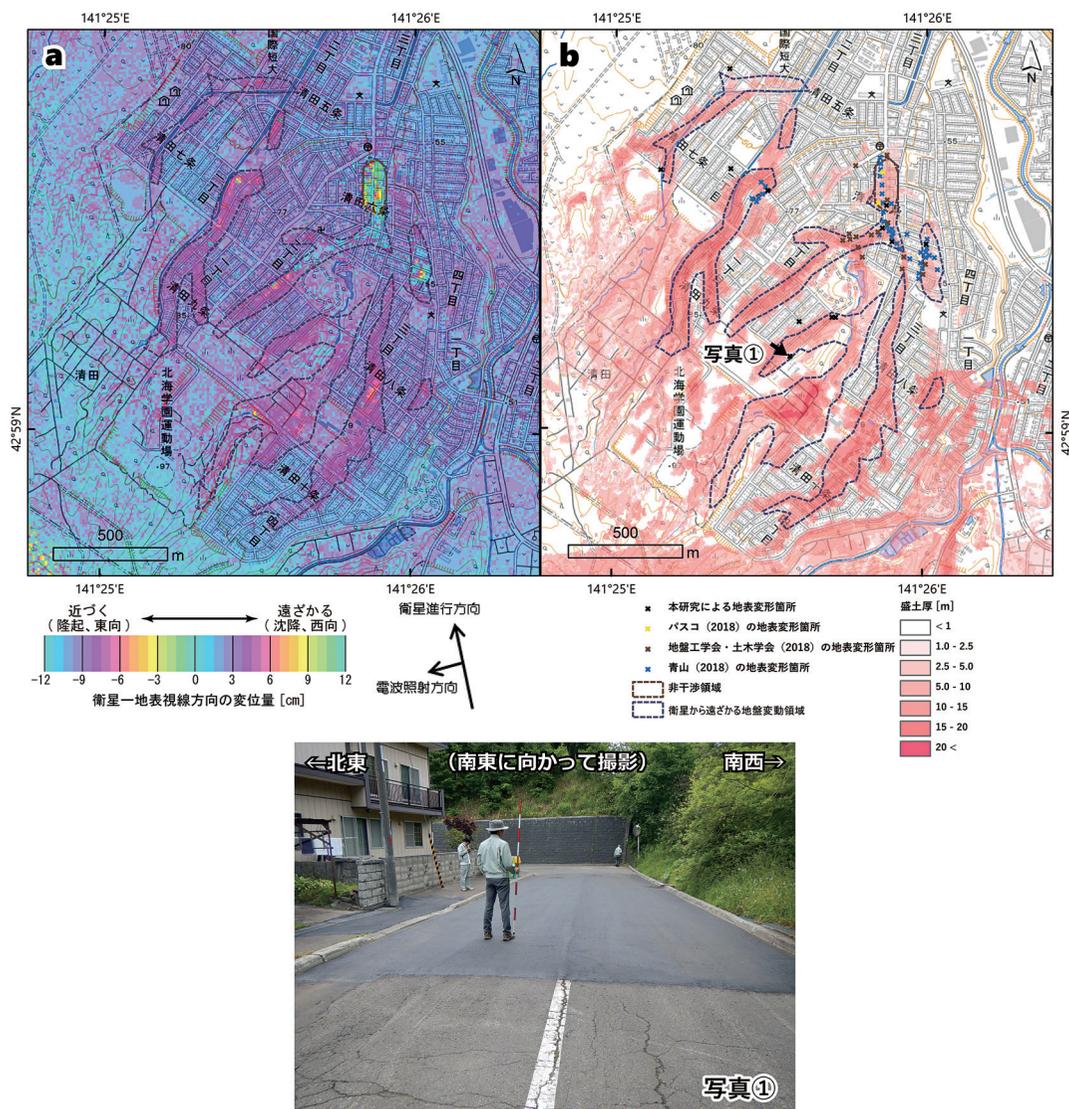


図8 (a) 札幌市清田区清田地区における SAR 干渉画像 (表 1 のペア H1) と (b) 盛土分布図 (背景は「地理院地図」)。写真①: 清田区清田八条二丁目目で確認した変形した道路の補修痕。複数回補修された痕跡を確認。北西側が低下。

区域)の結果を図9に示す。図4の範囲のうち、東側の盛土部を拡大表示している。なお、使用したDSMのメッシュサイズは0.2mであるが、図9では細かなノイズ低減のため、5×5メッシュの範囲でのフォーカル統計(平均化)処理を実施した結果を示している。ここでは基本的に標高が低下(沈下)する地表変位が発生するとともに、

現地調査により1m以上の標高低下は想定されないことから、標高変化が0〜−1mの領域を表示した。家屋の周囲を中心にノイズ的な標高変化箇所が多く現れているが、谷埋め盛土領域においては道路や空地において0〜0.5m程度の標高低下領域が広がっている。現地調査でも盛土領域の数cm〜数十cmの沈下を確認しており、谷埋

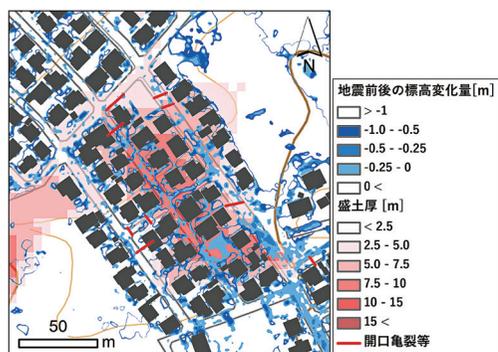


図9 熊本市龍田地区龍田三丁目の盛土部分の地震前後の標高変化量。0.2 m メッシュ DSM を用いた標高変化量図に対して、5 × 5 メッシュの範囲のフォーカル統計(平均化)処理を施した。

め盛土の滑動的変動による沈下を捉えたものと考えられる。

5. 干渉 SAR による盛土変動検出の妥当性の考察

4.1節で示したとおり、熊本地震の事例では、地震に伴い変動した谷埋め盛土部は SAR 干渉画像において局所的な非干渉領域あるいは位相変化領域として検出された。それらの大半は非干渉領域であり、SAR 干渉画像からは明確な変動量や変動方向を推測することはできなかったが、大津町つつじ台地区の事例では現地調査や造成前地形から想定される谷埋め盛土の変位様態と SAR 干渉画像の位相変化から推定される変動様態が整合していた。4.2節で示した北海道胆振東部地震の事例では、干渉 SAR により谷埋め盛土の変動(沈下)を広域的に検出できたことは、Fujiwara et al. (2019) などの既往研究や本研究における盛土分布と現地調査結果との比較から明らかである。以上の両地震の事例を踏まえると、干渉 SAR により地震に伴う宅地盛土の変動の検出が可能であると言える。

一方で、この局所的な位相変化領域あるいは非干渉領域は、地震前後の SAR 画像によるすべての SAR 干渉画像で確認できたわけではなく、検出されなかった画像も存在する(表1)。表1の

熊本地震のケースを見ると、入射角が43度を超えるような場合には検出できず、それよりも小さい場合は検出できる傾向が示唆される。入射角が小さいということは、地面に対してより垂直に近い角度で電波が照射されていることになるが、熊本地震の事例の谷埋め盛土の谷軸の多くが東西方向であること及び電波の照射方向が概ね東西方向であることを考えると、今回の事例で検出された谷埋め盛土の変動方向は水平成分(すなわち東西方向の変位)よりも上下成分の寄与が大きいことを示していると言える。なぜならば、水平成分が卓越していれば入射角が大きくても感度が十分であり、検出できるはずだからである。ただ、橋本・他(2017)が報告した熊本地震に伴う御船町や宇土市の宅地盛土の変動箇所や、飯場・永井(2018)などが報告した北海道胆振東部地震に伴う厚真町の宅地盛土での変動箇所では、どの干渉画像においても同様の変化は検出されなかった。これらの要因としては、2枚の SAR 画像の観測条件や対象地域の地形・土地被覆状態、盛土変動様態や周辺の地盤変動状況など、様々な要因が考えられ、特定することは困難である。さらに、盛土造成地などとは関係ないと思われる場所においても類似した局所的な非干渉領域が現れるケースもあり、SAR 干渉画像から盛土変動箇所を判読・抽出するには一定の判断能力が必要となる。

以上のように、①すべての盛土変動域が検出できるとは限らない、②すべての SAR 干渉画像で検出できるとは限らない、という制限はあるものの、主な宅地盛土の変動は実際に検出できており、発災後の災害対応における広域の地震被災域からの盛土変動被害箇所の抽出という点では、干渉 SAR は有効なツールと言える。

6. SfM-MVS 技術による盛土変動量の評価

4.3節で示したとおり、条件の揃った熊本地震の事例において、地震前後の空中写真と SfM-MVS 技術を活用して、盛土の変動量(標高変化量)を推定した結果、熊本市龍田三丁目の区画においては、ノイズが多いものの、谷埋め盛土の滑動的変動に伴う沈下を捉えたと考えられる標高低下域

が抽出できた。

一方で、同程度の沈下が発生したと考えられる熊本市龍田陳内二丁目においては、有意な標高低下を示す結果は得られなかった。これは、数 cm ~ 数十 cm レベルの標高変化は、高高度から撮影された空中写真を用いた SfM-MVS 処理による DSM の差分により検出するには、精度的に限界に近いことを示していると考えられる。これは、表 5 に示したとおり、SfM 処理時の基準点残差の高さ (Z) 成分が 10~50 cm 程度であることも調和的である。

7. まとめ

熊本地震と北海道胆振東部地震に伴い発生した谷埋め盛土造成地の滑動的変動について、干渉 SAR による変動域検出の妥当性を、SfM-MVS 技術を活用して作成した盛土分布図と現地調査結果とを照合しながら検討した。その結果、SAR 干渉画像で局所的な位相変化領域または非干渉領域として検出された箇所は、実際に滑動的な変動が生じた谷埋め盛土域と整合し、干渉 SAR による盛土変動域検出の有効性を示すことができた。また、一部の区域においては、地震前後の空中写真から SfM-MVS 技術により作成した DSM の差分から、盛土の変動量 (標高変化量) を推定することができた。これらから、少なくとも干渉 SAR による谷埋め盛土造成地の地震時変動域の検出と SfM-MVS 技術を活用した盛土分布図の作成は、地震後の迅速な災害対応等に寄与できると考える。

一方で、干渉 SAR による盛土変動域の検出は、観測条件や場の条件によっては適用できないこと、また、地震前後の空中写真から SfM-MVS 技術により作成した DSM の差分による盛土の標高変化量の推定は、数十 cm 以上の標高変化が発生したケースでないと明瞭には実施できない、という限界も示された。今後は、検出条件の調査も含めて、より精緻な解析方法の検討や手順のマニュアル化を試みたい。

謝辞

ここで使用いただいた 2 号の原初データの所有権は JAXA にあります。これらのデータは、だいち 2 号に関する国土地理院と JAXA の間の協定及び地震 SAR 解析 WG の活動に基づき提供されました。

引用文献

- 青山雅史：平成 30 年北海道胆振東部地震による札幌市清田区の宅地地盤被害, 2018. http://www.ajg.or.jp/disaster/files/201809_HokkaidoEq003.pdf, 2021 年 2 月 19 日閲覧
- Derrien, A., N. Villeneuve, A. Peltier and F. Beauducel: Retrieving 65 years of volcano summit deformation from multitemporal structure from motion: The case of Piton de la Fournaise (La Réunion Island), *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, pp.6959–6966, 2015.
- Fujiwara, S., Y. Morishita, T. Nakano, T. Kobayashi and H. Yari: Non-tectonic liquefaction-induced large surface displacements in the Aso Valley, Japan, caused by the 2016 Kumamoto earthquake, revealed by ALOS-2 SAR, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 474, pp.457–465, 2017.
- Fujiwara, S., T. Nakano, Y. Morishita: Detection of triggered shallow slips caused by large earthquakes using L-band SAR interferometry, *Earth, Planets and Space*, Vol. 72, No. 119, 2020.
- Fujiwara, S., T. Nakano, Y. Morishita, T. Kobayashi, H. Yari, H. Une and K. Hayashi: Detection and interpretation of local surface deformation from the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake using ALOS-2 SAR data, *Earth, Planets and Space*, Vol. 71, No. 64, 2019.
- Fujiwara, S., H. Yari, T. Kobayashi, Y. Morishita, T. Nakano, B. Miyahara, H. Nakai, Y. Miura, H. Ueshiba, Y. Kakiage and H. Une: Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, No. 160, 2016.
- Furukawa, Y. and J. Ponce: Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 32, pp.1362–1376, 2010.
- Gomez, C., Y. Hayakawa and H. Obanawa: A study

- of Japanese landscapes using structure from motion derived DSMs and DEMs based on historical aerial photographs: New opportunities for vegetation monitoring and diachronic geomorphology, *Geomorphology*, Vol. 242, pp.11-20, 2015.
- Hanssen, R.: *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*, Springer, 308p., 2001.
- 橋本 学：SARが見えたもの見えなかったもの：大阪北部地震と北海道胆振東部地震，京都大学防災研究所年報，No. 62，pp.296-305，2019.
- 橋本隆雄・梶田陽介・和田陽介：2016年熊本地震による御船町・宇土市の大規模盛土滑動崩落の考察，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol. 73, No. 4, I_881-I_893, 2017.
- 早川裕式・小花和宏之・齋藤 仁・内山庄一郎：SfM多視点ステレオ写真測量の地形学的应用，*地形*，Vol. 37, No. 3, pp.321-343, 2016.
- 廣瀬 亘：2.1 地形概要と表層地質・テフラ層序，第2部 地震地すべり発生の素因と変動の分類，地震による地すべり災害-2018年北海道胆振東部地震- (「地震による地すべり災害」刊行委員会編)，北海道大学出版会，pp.34-44，2020.
- 廣瀬 亘・加瀬善洋・川上源太郎・小安浩理・ト部厚志：平成30年北海道胆振東部地震に伴う地表変動および強震動による被害 (速報)，北海道地質研究所報告，No. 90，pp.15-32，2018.
- 本田昌樹・岩田昭雄・山下達也・林京之介・桑原將旗・酒井和紀・宗包浩志・住谷勝樹・堤 隆司・加古考範・齋田宏明・矢来博司・小林知勝・森下 遊：平成30年北海道胆振東部地震における SAR 干渉解析及び基準点復旧測量，国土地理院時報，No. 132，pp.41-49，2019.
- 飯場正紀・永井 宏：北海道胆振東部地震の被害調査報告書 (速報) 基礎地盤関連，2018. http://saigai.aij.or.jp/saigai_info/20180906_hokkaido/20181001_iburi_EQ_Soil_hokkaidoB.pdf，2021年1月12日閲覧
- 石黒聡士・熊原康博・後藤秀昭・中田 高・松多信尚・杉戸信彦・廣内大助・渡辺満久・澤 祥・鈴木康弘：UAVによる空撮と SfM-MVS 解析による地表地震断層の地形モデル作成とその精度 - 2014年11月長野県北部の地震を例に -，日本リモートセンシング学会誌，Vol. 36, No. 2, pp.107-116, 2016.
- 地盤工学会・土木学会：北海道胆振東部地震による液状化被害，2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震の被害調査速報会，2018.https://committees.jsce.or.jp/eec2/system/files/報告会20180921石川修正版_0.pdf，2021年1月12日閲覧
- 「地震による地すべり災害」刊行委員会編：地震による地すべり災害 - 2018年北海道胆振東部地震 -，北海道大学出版会，2020.
- 釜井俊孝：2004年新潟県中越地震による都市域の斜面災害，*応用地質*，Vol. 46, No. 3, pp.138-144, 2005.
- 釜井俊孝・守随治雄：斜面防災都市 - 都市における斜面災害の予測と対策，理工図書，200p., 2002.
- 川又基人・土井浩一郎・澤柿教伸・菅沼悠介：日本南極地域観測隊アーカイブ空中写真を用いた数値表層モデル作成とその有効性，*地理学評論*，Vol. 94, No. 1, pp.1-16, 2021.
- 清澤友弥・佐藤 浩：長野県小谷村における PALSAR-2干渉解析による地すべり性地表変動の検出，*日本地すべり学会誌*，Vol. 57, No. 1, pp.24-29, 2020.
- 清田 隆・京川裕之：東日本大震災による宮城県内の宅地造成地被災事例，*生産研究*，Vol. 63, No. 6, pp.7-13, 2011.
- 国土地理院：だいち2号干渉 SARによる変動の検出，平成28年熊本地震に関する情報，2016. <https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html#3>，2021年1月12日閲覧
- 国土地理院：だいち2号干渉 SARによる解析結果について，平成30年 (2018年) 北海道胆振東部地震に関する情報，2018.<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30-hokkaidoiburi-east-earthquake-index.html#6>，2021年1月12日閲覧
- 国土交通省：大規模盛土造成地の滑動崩落対策推進ガイドライン及び同解説，2015.https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_tk_000015.html，2021年1月22日閲覧
- 国土交通省：平成28年熊本地震による土砂災害の概要 (H28.9.14時点)，2016. https://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/160914_gaiyou_sokuhou.pdf，2021年1月22日閲覧
- Konagai, K., S. Nishiyama, K. Ohishi, D. Kodama and Y. Nanno: Large ground deformations caused by the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, *JSCE Journal of Disaster Fact Sheets*, FS2018-E-0003, pp.1-8, 2018.
- 倉橋稔幸・青木卓也：6.3 安平町とむかわ町の造成地における地すべり，第6部 地震地すべりの事

- 例：造成地の地すべり，地震による地すべり災害－2018年北海道胆振東部地震－（「地震による地すべり災害」刊行委員会編），北海道大学出版会，pp.205-209，2020.
- 黒沢 彰・大橋泰知：6.2 厚真中学校グラウンドにおける谷埋め盛土のスライド，第6部 地震地すべりの事例：造成地の地すべり，地震による地すべり災害－2018年北海道胆振東部地震－（「地震による地すべり災害」刊行委員会編），北海道大学出版会，pp.200-204，2020.
- 満上育久：Bundler: Structure from motion for unordered image collections, 映像情報メディア学会誌, Vol. 65, No. 4, pp.479-482, 2011.
- 宮崎真由美・望月貫一郎・下村博之・小俣雅志・三五大輔・森 良樹・渋谷典幸：10. 平成30年北海道胆振東部地震における取り組みと解析事例，小特集「平成30年の災害」，写真測量とリモートセンシング, Vol. 57, No. 6, pp.271-274, 2018.
- 森下 遊・山田晋也・山中雅之・吉川忠男・和田弘人・矢来博司・中埜貴元・飛田幹男・小林知勝・中島秀敏・神谷 泉：だいち2号 SAR 干渉解析により捉えられた平成26年（2014年）長野県北部の地震に伴う地殻変動と地表変形，国土地理院時報, No. 127, pp.47-56, 2015.
- 中村 明・丸山清輝・ハスバートル・野呂智之：地すべり観測事例による地震時の地すべり変動量特性，第60回平成23年度砂防学会研究発表会概要集, pp.444-445, 2011.
- 中埜貴元・藤原 智・森下 遊・小林知勝：干渉 SAR が捉えた小さな地表変位－熊本地震を例に－，防災科学技術研究所研究資料, No. 411, pp.151-154, 2017.
- Nakano, T., H. Une, K. Yoshida, S. Fujiwara and T. Kobayashi: Evaluating earthquake-related ground failure mapping by combined traditional and modern methods, *Advances in Cartography and GIScience of the ICA*, Vol. 1, No. 14, pp.1-8, 2019.
- 中里裕臣・奥山武彦・荒川隆嗣：新潟県釜塚地すべりにおける中越地震前後の GPS 移動観測事例，農業工学研究所技報, Vol. 205, pp.103-107, 2006.
- 沖村 孝・鍋島康之・岡田 肇・野並 賢：東北地方太平洋沖地震による仙台市内及び周辺の宅地被害調査報告，（公社）地盤工学会「東北地方太平洋沖地震の災害調査情報」（3）二次調査情報, 2011. https://www.jiban.or.jp/file/file/saigai_okimura_nabeshima_okada_nonami_0430_mini.pdf, 2021年1月12日閲覧
- パスコ：2018年9月 平成30年北海道胆振東部地震災害，札幌市清田区の現地調査, 2018. <https://corp.pasco.co.jp/disaster/earthquake/20180906.html>, 2021年2月19日閲覧
- 砂防学会：平成30年北海道胆振東部地震土砂災害緊急調査団第一次調査団調査報告, 2018. https://jsece.or.jp/branch/hokkaido/common/media/pdf/20180926iburitobu_chosa_houkoku.pdf, 2021年1月22日閲覧
- Saito, H., S. Uchiyama, Y. S. Hayakawa and H. Obanawa: Landslides triggered by an earthquake and heavy rainfalls at Aso volcano, Japan, detected by UAS and SfM-MVS photogrammetry, *Progress in Earth and Planetary Science*, Vol. 5, No. 15, 2018.
- 佐藤 浩・宮原伐折羅・岡谷隆基・小荒井衛・関口辰夫・八木浩司：SAR 干渉画像で検出した2011年東北地方太平洋沖地震に関わる地すべり性地表変動，日本地すべり学会誌, Vol. 51, No. 2, pp.41-49, 2014.
- 佐藤 浩・中埜貴元：仙台市の丘陵地における地すべり性地表変動の状況，国土地理院時報, No. 122, pp.153-161, 2011.
- Sato, H.P. and H. Une: Detection of the 2015 Gorkha earthquake-induced landslide surface deformation in Kathmandu using InSAR images from PALSAR-2 data, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, No. 47, 2016.
- Shirahama, Y., M. Yoshimi, Y. Awata, T. Maruyama, T. Azuma, Y. Miyashita, H. Mori, K. Imanishi, N. Takeda, T. Ochi, M. Otsubo, D. Asahina and A. Miyakawa: Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth, Planets and Space*, Vol. 68, No. 191, 2016.
- Snavely, N., S. M. Seitz and R. Szeliski: Modeling the World from Internet Photo Collections, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 80, pp.189-210, 2007.
- 田近 淳・千木良雅弘・小池明夫・金 秀俊・石丸聡・雨宮和夫：2018年北海道胆振東部地震によるテフラ層すべりと人的被害，日本地すべり学会誌, Vol. 57, No. 6, pp.203-209, 2020.
- 坪山厚実・平岡城栄・安倍榛哉・秋葉淳一：6.1 豊沢地区（ルーラルビレッジ）における地震による変動，第6部 地震地すべりの事例：造成地の地すべり，地震による地すべり災害－2018

- 年北海道胆振東部地震－（「地震による地すべり災害」刊行委員会編），北海道大学出版会，pp.194-199，2020.
- 内山庄一郎・須貝俊彦：平成26年8月豪雨による広島市土石流災害の被害の特徴，自然災害学会誌，Vol.38，特別号，pp.57-79，2019.
- 上村祐一：熊本市大規模盛土造成地の地震被害の特徴と自治体の対応，地質と調査，2017年第3号（通巻150号），pp.12-17，2017.
- 上芝晴香・三浦優司・宮原伐折羅・仲井博之・本田昌樹・攪上泰亮・山下達也・矢来博司・小林知勝・森下遊：だいち2号 SAR 干渉解析による熊本地震に伴う地殻変動の検出，国土地理院時報，No. 128，pp.139-146，2016.
- 宇根寛・佐藤浩・矢来博司・飛田幹男：SAR 干渉画像を用いた能登半島地震及び中越沖地震に伴う地表変動の解析，日本地すべり学会誌，Vol. 45，No. 2，pp. 125-131，2008.
- 若松加寿江・先名重樹・小澤京子：平成28年（2016年）熊本地震による液状化発生の特性，日本地震工学会論文集，Vol. 17，No. 4，pp.81-100，2017.
- 若松加寿江・吉田望・清田隆：第6章造成地の被害，土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，pp.6-1-6-46，2011.
- 横田彰宏・重野聖之・西村智博・本田謙一・向山栄：干渉 SAR と古地理でみる札幌市の地震被害－2018年北海道胆振東部地震－，2019年日本地理学会春季学術大会発表要旨集，p.232，2019.

（投稿受理：令和3年3月29日
訂正稿受理：令和3年7月2日）

要 旨

大規模な地震が発生した際には、宅地造成地における谷埋め盛土造成地などが滑動的に変動することがある。本研究では、2016年熊本地震と2018年北海道胆振東部地震に伴い発生した谷埋め盛土造成地の滑動的変動について、干渉 SAR による変動域検出の妥当性を、SfM-MVS 技術を活用して作成した盛土分布図及び現地調査結果と照合しながら検討した。その結果、SAR 電波の入射角が小さい場合の SAR 干渉画像において局所的な位相変化領域または非干渉領域が検出され、その箇所は実際に滑動的な変動が生じた谷埋め盛土域と整合し、主に地震後の災害対応時における干渉 SAR による盛土変動域検出の有効性を示すことができた。また、一部の区域においては、地震前後の空中写真から SfM-MVS 技術により作成した DSM の差分から、盛土の変動量（標高変化量）を推定することができた。