

3-2 クロストラック干渉 SAR データセットの土砂崩れに関する解析

3-2 *Landslide Analysis using Cross-track Interferometric SAR Data*

上本純平 児島正一郎 灘井章嗣 中川勝広

Jyunpei UEMOTO, Shoichiro KOJIMA, Akitsugu NADAI, and Katsuhiko NAKAGAWA

合成開口レーダー (Synthetic Aperture Radar: SAR) は、昼夜間問わず、また雲や噴煙の存在にかかわらず地表面を可視化することができるため、災害観測に適したリモートセンシングツールである。本稿では土砂崩れ場所付近における地震前後の差分高マップをクロストラック干渉 SAR 計測に基づき導出し、他センサーデータとの比較を通じてその評価を行った結果について報告する。

The synthetic aperture radar (SAR) is a useful remote sensing tool for disaster monitoring owing to its capabilities for day/night observation under all weather conditions. In this article, we derive the height difference map in the landslide area before and after the earthquake and then evaluate it by comparing the results with data from another sensor.

1 まえがき

リモートセンシングツールのひとつである SAR は、電波の送受信を介して対象物の形状・位置等を高い空間分解能で可視化することのできる装置である [1]。SAR は自ら電波を照射する能動型のレーダーであるため昼夜間問わず、またマイクロ波帯の電波を利用することで雲や噴煙の有無を問わず対象物を観測することができる [2]。地表面を観測する SAR は航空機や人工衛星といったプラットフォームに搭載され、そのプラットフォームの移動に合わせアンテナから斜め下に電波を送受信することで面的な観測を実現している。人工衛星と航空機では観測対象となる地表面からの距離 (飛行高度) が 100 km のオーダーで異なるが、SAR の信号処理の特性上両者に空間分解能の優劣は生じない [2]。ただし、観測機会については次のような差がある。すなわち、定期的な繰り返し観測については周回軌道をとる衛星 SAR が適しているのに対し、多方向からの観測には軌道が固定されていない分、航空機 SAR が適している。具体例を挙げるとすれば、地盤沈下の継続的なモニタリング [3] などには衛星 SAR に優位性があり、険しい山岳地形の観測 [4] 等には航空機 SAR に優位性がある。このように、衛星 SAR と航空機 SAR は観測目的に依存して相補的な関係にある。

NICT では、1993 年から X バンド航空機 SAR である Polarimetric and Interferometric SAR (Pi-SAR) シ

リーズの開発及びその取得データの解析に関する研究を行っており [5] [6]、現在は第三世代の Pi-SAR X3[7] を開発中である。Pi-SAR シリーズに関する研究目的のひとつは、噴火・地震・豪雨・土砂崩れ等の自然災害の被災地エリアの迅速な状況把握である。上述のように SAR は昼夜間問わず、また雲や噴煙の存在にかかわらず地表面を可視化することができるため迅速性が求められる災害観測に適している。NICT ではこれまでに三宅島 [8]・新燃岳 [4]・御嶽山 [9] 等の噴火に伴う火口付近の観測、新潟中越地震 [10]・東北地方太平洋沖地震 [11]・熊本地震に伴う被災地エリアの土砂崩れ [12] や津波の浸水域の観測 [13] 及び紀伊半島の豪雨に伴う自然ダムや土砂崩れの観測 [14] を行ってきた。また、観測実施から画像データ提供までの迅速化を目的とし、観測データの機上処理システムの開発 [11] [15] も行っている。このシステムによれば観測の合間に観測データ画像を生成し、航空機から衛星通信経由でインターネット上へ直接提供することができる。

被災地エリアの迅速な状況把握のためには上述の迅速な観測及び画像化信号処理に加え、観測画像データからの情報抽出の迅速化が必要である。ここでネックとなるのが、SAR 画像データに固有のジオメトリック変調と呼ばれるゆがみ [1] である。このゆがみは SAR の斜め観測という観測原理に由来している。このゆがみのため、SAR 画像から目視で情報抽出を行うには経験が必要である。この問題に対する有力な解決方法のひとつは、情報抽出の自動化である。近年著

者らは地震前後の SAR 観測データからの土砂崩れの自動検出方法を提案している [16]。この方法は、地震前後の地表面からの反射強度の変化と高さ変化を組み合わせることにより誤検出の削減を達成している点で特徴的である。土砂崩れに対する初期観測で重要なのは、発生場所マップの作成 [17] 及び各個の崩壊規模の推定 [18] である。規模推定の実施例としては、人工衛星によるクロストラック干渉 SAR (Cross-track Interferometric SAR: XTI) 計測と数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) の差分量に基づき、2008 年の四川大地震 (中国・四川省) に伴う巨大土砂崩れについてその土砂流出量を推定した結果が文献 [19] によって報告されている。一方、文献 [16] ではその過程において地震前後の XTI 計測データから差分高マップの生成を行っているものの、アウトプットとしては土砂崩れマップの作成にとどまっている。土砂崩れマップの生成に加え、規模推定を達成するためにはまず地震前後の SAR 観測データから計測された差分高マップについての評価が必要である。そこで本稿では SAR で計測された差分高マップについて、他センサーデータとの比較を通じて評価を行った結果を報告する。2 では、XTI による土砂崩れに伴う差分高マップの作成手法の概要について述べる。3 では熊本地震の際に阿蘇大橋近辺で生じた大規模土砂崩れについて、XTI 高さ計測により地震前後の差分高マップを生成する。4 では文献 [20] により報告されている他センサー計測による解析結果との比較を行い、5 でまとめる。

2 XTI による土砂崩れに伴う高さ変化マップの作成

図 1 に XTI による高さ計測の模式図を示す。SAR では、送信波の往復時間を介してアンテナから対象物までの直線距離を求めている。このことは、1つのアンテナのみを用いた観測では、対象物が点線で示した円周上のどの位置にあるか決定できないことを意味する。図 1 で言えば、対象物の位置が A なのか B なのか区別できない。この問題は、アンテナ 1 とは別の受信アンテナ 2 を用意することで解決できる。アンテナ 2 においては、送信から受信までの電波の伝搬経路の長さを計測しており、アンテナ 1 で送受信した場合との伝搬経路長差は図中赤線に相当する。図に示したように、この経路長差は円周上の位置によって変化するため、各アンテナで計測した伝搬経路長の差から、対象物の水平位置と高さを一意に決めることができる。これが XTI による高さ計測の原理である。実際の観

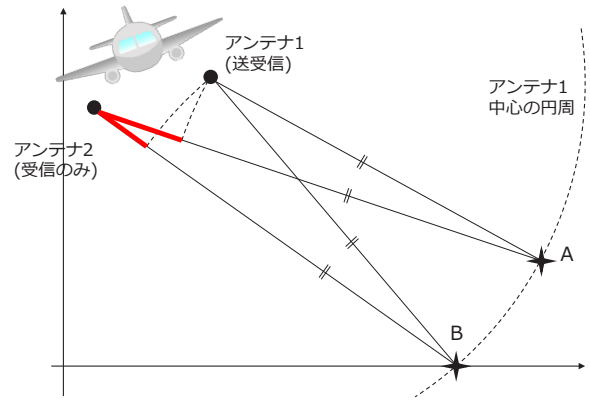


図 1 XTI による対象物の高さ計測の模式図。赤線は各対象物に対する電波の伝搬経路長差を示す。

測では、この経路長差は、アンテナ 1 とアンテナ 2 の受信信号を干渉させ位相差として求めている。位相差として計測することにより、観測波長のスケールに対応する精度で計測できるメリットがある一方、観測される位相差が実際の経路差に相当する位相差を 2π で除した際の剰余値に畳まれてしまうデメリットがある。このため、XTI による高さ計測では、畳まれた位相差を元の位相差に回復するアンラッピングプロセス [21] が必要とされる。また、観測される位相差には、各アンテナから信号処理部までのケーブル長の違い等に由来する未知のオフセット [22] も含まれている。したがって、対象物の高さを求めるためには、この位相オフセット値を推定する必要がある。例えば、SAR 画像中で高さが既知の点を参照点として用意し、このオフセットを求める方法がある [23]。

上述の手法により、SAR 観測実施時点の高さマップを得ることができる。したがって、土砂崩れの発生前後でそれぞれ高さマップを導出し、その差分を取れば土砂崩れに伴う高さ変化を計測できる。ただし、地震発生時には本稿で対象としている土砂崩れに加え、断層ずれ等の発生も予想されるため、常に地震後のデータに対して有効な参照点が用意できるとは限らない。また、必ずしも地震前後の各高さマップが欲しいわけではなく、必要なのは差分高マップである。そこで文献 [16] では振幅画像の相関値に基づき地震前後で変化の乏しいと思われる場所を抽出し、その場所の高さ変化を 0 とすることで参照点を用いず差分高マップを算出する方法を提案している。ただし、この方法は土砂崩れ場所の検出への利用に耐え得る精度は有しているものの、原理的に電波の入射角依存性の点での近似が過大となるため、差分高マップの精度に悪影響を及ぼす恐れがある点には注意を要する。

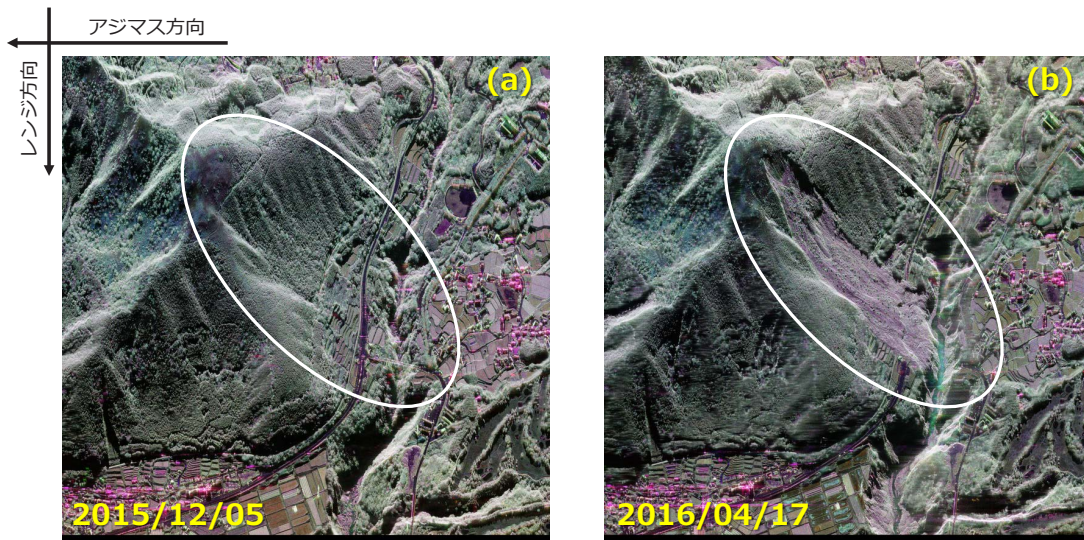


図2 地震前 (a)、地震後 (b) の偏波疑似カラー画像。Hを水平偏波、Vを垂直偏波、XYをX偏波送信、Y偏波受信と表した場合、HH、HV、VVをそれぞれ赤、緑、青として着色している。丸枠は本稿での解析対象の土砂崩れ位置を示す。

3 阿蘇大橋近辺で生じた大規模土砂崩れの差分高解析

2016年4月16日午前1時25分に最大震度7の地震が熊本地方で発生した[24]。これを受け、NICTでは翌日の4月17日早朝にPi-SAR2による被災地の緊急観測を実施した[25]。実は、NICTでは約4か月前の2015年12月15日に阿蘇山の活発化に伴い、熊本地方の観測を実施していた。この観測データを事前データとして有効活用すべく、4月17日の被災地付近の観測においては、2015年12月の観測に基づきその飛行経路が決定された。図2に阿蘇大橋近辺で生じた土砂崩れについての地震前後の観測画像例を示す。これらの画像サイズはレンジ方向、アジマス方向それぞれ2 kmであり、ほぼ平行な観測軌道で取得されたものである。図中の色は偏波を疑似カラーで表したも

のである。送受信の偏波が同一の偏波(ライク偏波)を赤/青として、送受信の偏波が異なる偏波(クロス偏波)を緑として着色すると、植性の存在する場所ではクロス偏波が卓越するため緑色に、地面ではライク偏波が卓越するため紫色に見えることが知られている[26]。図2中の丸枠で示した部分を見ると、地震前は緑色だったのに対し、地震後は紫色に変色している様子が見て取れる。この場所で発生した土砂崩れに伴い、生え揃っていた木々がなぎ倒され地面が露出したことが画像の比較から読み取れる。

図3に地震前後における高さマップを示す。参照点としては、国土地理院の10 mメッシュDEM[27]を用いた。色の違いから各々のマップにおける山谷の高低差は視認できるものの、地震前後での高さ変化量の読取は難しい。このことから変化量を把握するためには差分高マップが必須であることが分かる。文献[16]

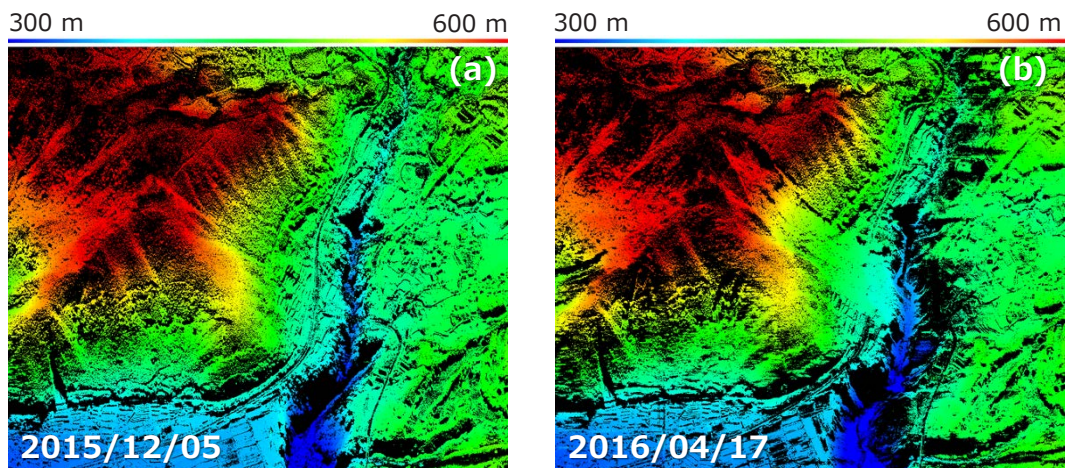


図3 地震前 (a)、地震後 (b) の高さマップ。黒い部分は干渉度が基準に満たなかったため高さが算出されていない部分である。

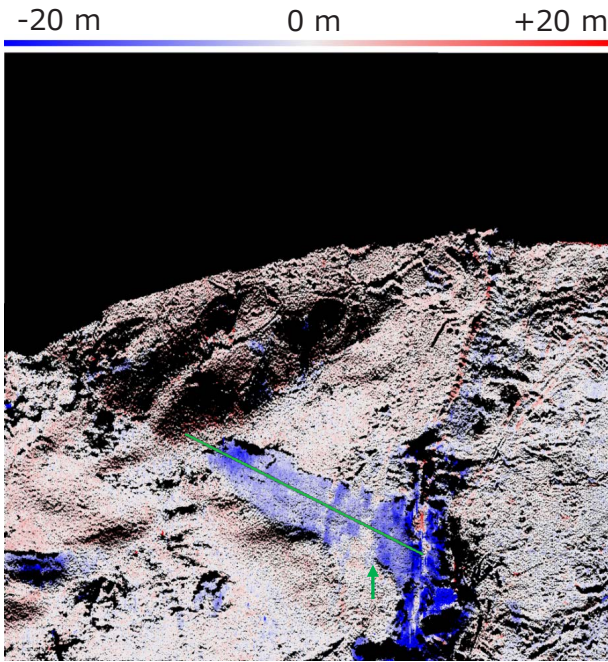


図4 XTI計測による差分高マップ。黒い部分は座標変換に伴うデータ空白部分及び干渉度が基準に満たなかったため差分高が算出されていない部分である。緑線は図5の断面位置を示す。矢印はエリア2とエリア3の境の崖線位置を示す。

の手法に基づき作成した差分高マップを図4に示す。なお、4での他センサーデータとの比較のため、座標系はレーダー座標系から地図座標系へ変換している。この図では地震後に高さが低くなった場合は青、高くなった場合は赤で示している。一見して明らかなように土砂崩れ発生場所では、青色に着色されている、つまり高さが低くなっている様子が見て取れる。その一方、その他の土砂崩れの発生していない場所では、極端に赤青に寄った色はほとんど見られない。つまり高さ変化が小さかったと判断できる。以上のことからXTIによる高さ計測データの差分をとることにより、土砂崩れに伴う高さ変化を抽出できていることが分かる。

4 他センサーデータとの比較

3で得られたXTIによる差分高マップについて評価するため、文献[20]により報告されている地震前後のレーザー測量データによる解析結果との比較を行った。図5に図4中の緑線で示した位置における断面図を示す。なお、断面を取った位置は文献[20]と必ずしも一致しない可能性がある点に注意されたい。文献[20]にならい、図中に示したように3つのエリアに分割してそれぞれ比較する。まず、エリア1においては、図5では10 mから15 m程度の高度低下を示しているのに対し、文献[20]では最深部で20 m以上の低下

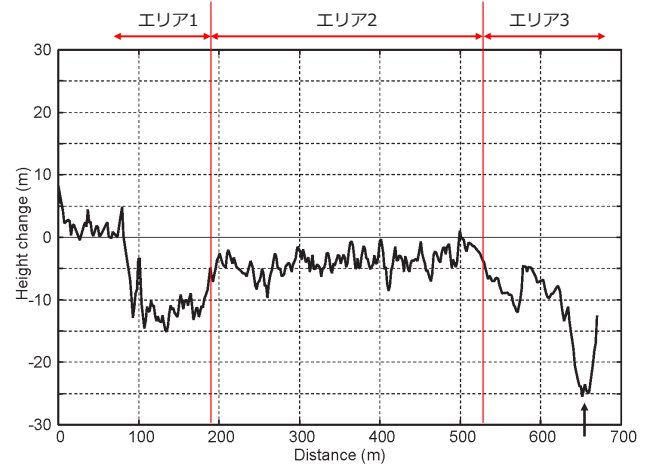


図5 図4の緑線の位置における土砂崩れの断面プロファイル。横軸の向きは上流から下流である。

があったと報告されている。このことはXTI計測による結果が5 mから10 m程度崩壊深を浅く見積っていることを意味する。次にエリア2においては、エリア1とは逆に0 mから5 m程度XTI計測結果の方が深く見積もられていた。エリア3においては、図5中の矢印部を除き0 mから5 m程度XTI計測による差分高マップの方が浅く見積もられていた。なお、図4においてはエリア2とエリア3との間に明瞭な崖線を見て取れるが(図4矢印参照)、図5では不明瞭である。南北方向(図の上下方向)の位置により崖の勾配に差異がある可能性がある。

土砂崩れ発生前の空中写真と見比べた結果、エリア2における差異は次のように解釈できる(図6)。すなわち、XTI計測による差分高は樹木の高さを含めた高さ変化量に相当する一方、文献[20]では地表面の高さ変化がプロットされているため差異が生じていると考えられる。エリア3の矢印部において文献[20]の断面図では見られない深さ25 m程度の高度低下が見られるが、この差異も同様に樹林の影響が疑われる。樹木の影響が表れているということは、裏を返すとXTI計測の差分高マップ解析を通じてなぎ倒された樹木量を推定できる可能性があることを示唆している。災害からの復旧に際し、これらの樹木も除去・運搬する必要があることを考えると、なぎ倒された樹木量も意味のある計測量と考えられ、今後その利用価値を見極める必要がある。

一方、エリア1において崩壊深が浅く見積もられていることについては、樹林の影響では説明できない。図6に示したように、樹林の影響があるとすれば逆にXTI計測の差分高の方が低くなるはずである。この誤差要因のひとつとしては、2で述べた本稿で使用した差分高マップの導出方法[16]の過大近似の影響が疑われる。この影響の度合いを評価するためには、地震

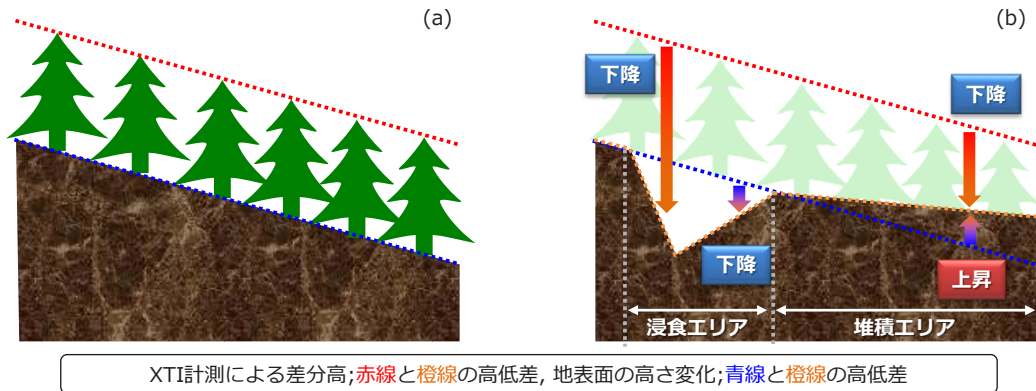


図6 XTI計測による差分高と地表面の高さ変化に違いが生じるメカニズム

の影響が無い参照点を目視で選ぶなどして地震前後のXTI計測による高さマップをそれぞれ作成したうえで差分高マップを導出し、本稿のXTI差分高マップ(図4)と比較することが今後必要である。この他にも差分高マップ生成の際の位置合わせの精度が悪影響を及ぼした可能性がある。文献[18]により、レーザー測量/DEMによる差分高マップの生成時に局所的な位置合わせを行うことで誤差を軽減する手法が提案され、その効果が実証されている。傾斜地においては、発生前後の高さマップ間に存在する水平方向の位置誤差が差分高マップの高さ方向の誤差として表れる。この点も今後確認が必要である。

【参考文献】

- 1 大内和夫, リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎. 学校法人東京電機大学 東京電機大学出版局, 2004.
- 2 基礎からわかるリモートセンシング. 理工図書株式会社, 2011.
- 3 橋詰和紀, 田村正行, "PSInSARとSBASの組み合わせによる地盤変動の計測," リモートセンシング学会学術講演会(秋季), 2014, pp.91-92.
- 4 T. Kobayashi, T. Umehara, J. Uemoto, M. Satake, S. Kojima, T. Matsuoka, A. Nadai, and S. Uratsuka, "Volcanic monitoring by polarimetric and interferometric airborne SAR (Pi-SAR2)," Conference Proceedings of APSAR, 2013.
- 5 T. Kobayashi, M. Satake, H. Masuko, M. Shimada, H. Oaku, and U. Toshihiko, "The airborne X/L-band SAR system of CRL/NASDA: system description and preliminary results," in Proceedings of IGARSS, 1997, pp.1389-1391.
- 6 A. Nadai, S. Uratsuka, T. Umehara, T. Matsuoka, T. Kobayashi, and M. Satake, "Development of X-band airborne polarimetric and interferometric SAR with sub-meter spatial resolution," in Proceedings of the IEEE IGARSS, 2009, vol.2, pp.II-913-II-916.
- 7 S. Kojima, A. Nadai, J. Uemoto, T. Kobayashi, T. Matsuoka, T. Umehara, and M. Tanaka, "DEVELOPMENT OF THIRD GENERATION POLARIMETRIC AND INTERFEROMETRIC X-BAND AIRBORNE SYNTHETIC APERTURE RADAR (PI-SAR X3) SYSTEM," in Proceedings of ISRS, 2017.
- 8 佐竹誠, 浦塚清峰, 梅原俊彦, 前野英生, 灘井章嗣, 小林達治, 松岡健志, 真鍋武嗣, 増子治信, "航空機搭載3次元高分解能映像レーダ(Pi-SAR)応用実験," 通信総合研究所季報, vol.48, pp.113-125, 2002.
- 9 "航空機搭載合成開口レーダPi-SAR2による御嶽山の観測." [Online]. Available: <http://www2.nict.go.jp/res/pisar2-ontake/>. [Accessed: 11-Mar-2019].
- 10 S. Uratsuka, T. Moriyama, T. Umehara, A. Nadai, T. Matsuoka, K. Nakamura, and H. Masuko, "Disastrous environment after earthquake observed by airborne SAR (Pi-SAR)," in Proceedings of IGARSS, 2005, vol.6, pp.4081-4083.
- 11 J. Uemoto, S. Uratsuka, T. Umehara, S.-I. Yamamoto, S. Taira, M. Satake, S. Kojima, T. Kobayashi, M. Satoh, K. Kawasaki, T. Matsuoka, A. Nadai, and R. Suzuki, "Development of the onboard processor for Pi-SAR2," in Proceedings of IGARSS, 2011.
- 12 森山敏文, 実藤史明, 上本純平, 石黒敬典, 山口芳雄, "航空機搭載偏波・干渉SARデータによる土砂崩れ検出," 信学技報, 2017, pp.1-5.
- 13 児島正一郎, 有馬悠也, 山本和朋, 是津耕司, "Pi-SAR X2とGISデータを用いた浸水領域の抽出," リモートセンシング学会学術講演会(秋季), 2018, pp.291-292.
- 14 浦塚清峰, "雲の上から災害を捉える…航空機搭載合成開口レーダ," 山の防災システムセミナー, 2015.
- 15 上本純平, 児島正一郎, 梅原俊彦, 小林達治, 佐竹誠, 浦塚清峰, 松岡健志, "Pi-SAR2用新機上処理装置の開発," リモートセンシング学会学術講演会(秋季), 2013.
- 16 J. Uemoto, T. Moriyama, A. Nadai, S. Kojima, and T. Umehara, "Landslide detection based on height and amplitude differences using pre- and post-event airborne X-band SAR data," Nat. Hazards, vol.95, no.3, pp.485-503, 2019.

5 まとめ

SARは昼夜間問わず、また雲や噴煙の存在にかかわらず地表面を可視化することができるため、迅速性が求められる災害観測に適したリモートセンシングツールである。本稿ではSARで観測する差分高マップについて、他センサーデータとの比較を通じた評価結果について述べた。その結果、XTI計測による差分高マップには、純粋な地面の高さ変化に加え、樹木の影響が含まれた差分高が算出されていることが示唆された。樹木の影響が含まれているということは、なぎ倒された樹木量も推定できる可能性があるということを示唆する。この点についてはその利用価値も含め今後更なる検討が必要とされる。一方、上流の崩壊場所においては、XTI計測の結果は崩壊深がかなり浅く見積もられていることが示唆された。この点については原因の追究及び改善が必要である。

謝辞

本解析では国土地理院の数値標高モデルを出典明示の上利用させて頂いた。ここに謝意を示します。

3 航空機 SAR による地表面の観測

- 17 S. Plank, "Rapid damage assessment by means of multi-temporal SAR-A comprehensive review and outlook to Sentinel-1," Remote Sens., vol.6, no.6, pp.4870-4906, 2014.
- 18 三浦弘之, 弓真由子, "非線形写像法による航空レーザ測量データの幾何補正と それに基づく 年広島豪雨災害での崩壊土砂量の推定," 地域安全学会論文集, no.27, pp.283-292, 2015.
- 19 Y. Tang, Z. Zhang, C. Wang, H. Zhang, F. Wu, and M. Liu, "Characterization of the giant landslide at Wenjiagou by the insar technique using TSX-TDX CoSSC data," Landslides, vol.12, no.5, pp.1015-1021, 2015.
- 20 石川芳治, 久保田哲也, 青戸一峰, 飯島康夫, 井川寿之, 池上忠, 池田誠, 植弘隆, 上原祐治, 内村雄一, 江川佳苗, 大石博之, 岡野和行, 海堀正博, 桂真也, 加藤誠章, 川原慎一郎, 古賀省三, 坂島俊彦, 相楽渉, 地頭蘭隆, 篠原慶規, 清水収, 下田義文, 鈴木滋, 鈴木正美, 瀬戸康平, 田方智, 寺田秀樹, 寺本行芳, 堂ノ脇将光, 飛岡啓之, 鳥田英司, 中濃耕司, 西川友章, 花田良太, 平川泰之, 福塚康三郎, 藤澤康弘, 藤田正治, 正木光一, 宮田直樹, 山口和也, 山下伸太郎, 山根誠, 横尾公博, "平成 28 年熊本地震による土砂災害," 砂防学会誌, vol.69, no.3, pp.55-66, 2016.
- 21 D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, Two-dimensional phase unwrapping : theory, algorithms, and software. Wiley, 1998.
- 22 D. Petit, F. Adragna, and J.-D. Durou, "Filtering of layover areas in high-resolution IFSAR for building extraction," in Proc. SPIE 4173, SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques III, 2000, pp.230-240.
- 23 M. A. Richards, "A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing," IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag., vol.22, no.9, pp.5-29, 2007.
- 24 "気象庁 震度データベース検索." [Online]. Available: <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.php>. [Accessed: 11-Mar-2019].
- 25 久保田実, 浦塚清峰, 児島正一郎, 上本純平, 灘井章嗣, 梅原俊彦, 松岡建志, 小林達治, 三森麻衣子, "航空機搭載高分解能合成開口レーダー (Pi-SAR2) を用いた熊本地震の被災状況把握," 日本地球惑星科学連合, 2016.
- 26 水野正樹, 神山嬢子, 江川真史, 佐藤匠, 蒲原潤一, "2 偏波 SAR 画像による大規模崩壊及び河道閉塞箇所の判読調査手法 (案)," 2014.
- 27 "国土地理院 基盤地図情報サイト." [Online]. Available: <http://www.gsi.go.jp/kiban/>. [Accessed: 11-Mar-2019].



中川勝広 (なかがわ かつひろ)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
室長
博士 (工学)
レーダー水文学

上本純平 (うえもと じゅんぺい)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
主任研究員
博士 (理学)
計測工学, 超高層物理学



児島正一郎 (こじま しょういちろう)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
研究マネージャー
博士 (工学)
計測工学・海岸工学

灘井章嗣 (なだい あきつぐ)

電磁波研究所
リモートセンシング研究室
沖縄電磁波技術センター長
海洋リモートセンシング