

熊本地震における航空・衛星リモートセンシングの利用

千葉大学 大学院工学研究科
山崎文雄

1. はじめに

リモートセンシングは、光や熱などの電磁波を観測するセンサを用いて、宇宙や空中地表や大気の状態を把握する技術である。代表的なものが、人工衛星による気象観測や陸域観測であり、すでに40年余りの歴史を有する。従来は衛星画像の解像度が最大20-30m程度であったこともあり、観測データは主に資源探査や環境把握に使われていた。防災利用に関しては、大規模な斜面崩壊などの地盤災害や、堪水が長期に続く大陸型洪水の把握などに限定されていた。近年、リモートセンシングの防災利用が拡大しているのは、センサとプラットフォーム（衛星、航空機など）の技術革新に負うところが大きい。センサとしては、光学（可視・近赤外）センサ、マイクロ波センサ、熱赤外センサなどが代表的なもので、近年これらの空間分解能が大きく向上した。またセンサに向きを変える機能が付いたため、災害の観測頻度が大幅に向上した。全天候型のマイクロ波センサ（合成開口レーダ：SAR）を搭載した衛星が増えたことも、利用拡大に貢献している。本文では、2016年熊本地震における実用例を通して、リモートセンシングの防災分野における今後の動向について考えてみる。

2. 熊本地震の概要

2016年4月14日21時26分に熊本県熊本地方の深さ約10kmにおいて、マグニチュード(M)6.5の地震が発生した¹⁾。この地震を引き起こしたのは、震源付近を走る日奈久断層と考えられ、益城町役場に設置された地震計で震度7を記録した。この地震により、回送中の九州新幹線が脱線し、熊本城が被害を受けた。また、益城町を中心に木造住宅が倒壊し、計9人の死者が報告された。

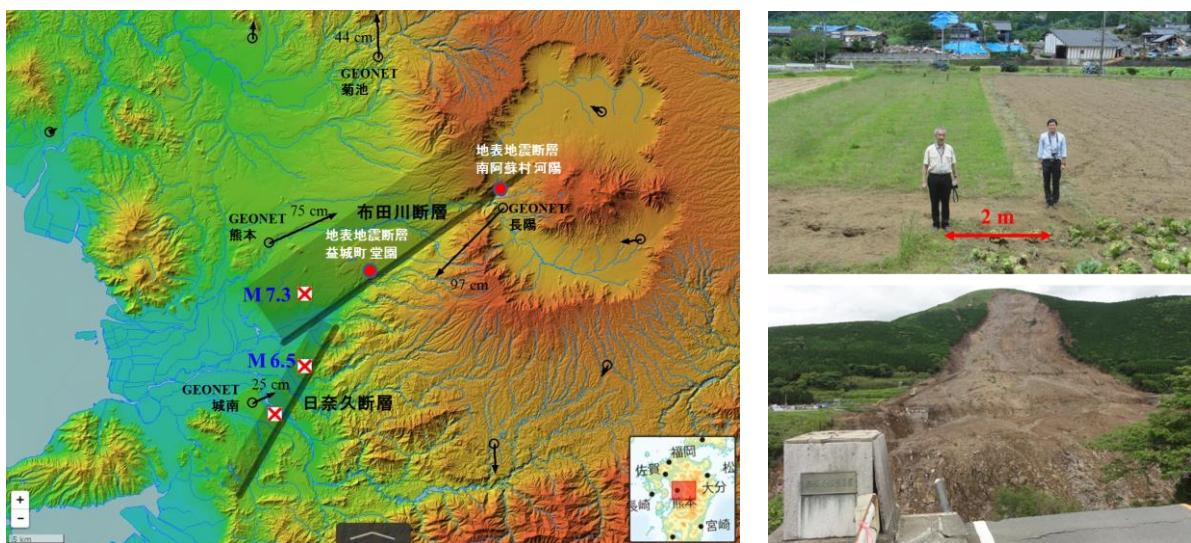


図1 熊本地震の震源断層と電子基準点の位置(左)、地表地震断層(右上)と阿蘇大橋落橋現場 (右下)

さらにこの約 28 時間後の 4 月 16 日 1 時 25 分に、M7.3 の地震がほぼ同じ地域を襲った。益城町では再び震度 7 を記録し、さらに多くの建物が倒壊、阿蘇カルデラの外輪山を中心に多数の斜面崩壊が発生、阿蘇大橋が落橋するなど非常に大きな地震災害となった。この後も布田川断層帯に沿って多数の余震が続き、熊本地震と命名された（4 月 14 日は前震、16 日は本震）。一連の熊本地震による直接の死者は 50 人となった。推定される震源断層モデルと電子基準点の位置を図 1 に示す。GPS などからの電波を受信し正確な位置を観測する国土地理院の電子基準点(GEONET)は、全国で約 1,200 カ所設置されているが、本震による最大の水平移動量は、熊本観測点の 75cm と長陽観測点の 97cm である²⁾。図 1 の写真に示すように、益城町堂園、西原村大切畑ダム、南阿蘇村河陽などの布田川断層に沿った地区で、地表地震断層が出現した。

地震発生直後から、国土地理院や航測会社などにより、航空写真撮影、航空レーザー測量、ドローン空撮などが多数実施された。また、日本の陸域観測衛星 ALOS-2（だいち 2 号）や各国の人工衛星が被災地域を観測した。熊本地震では、このようにリモートセンシングと測位技術が多用された。

3. 衛星光学センサの利用

防災利用の光学センサ衛星は、地上分解能 10-30m 程度の中解像度衛星 (Landsat, ASTER,) と、同 1m 程度以下の高解像度衛星 (GeoEye-1, WorldView-3 など) が主なものである。これらの多くは、可視光 3 バンド (RGB) と近赤外 (NIR) バンドを有している。近年の大規模自然災害では、発災直後よりさまざまな衛星画像が次々とウェブ上でも公開され、被災状況把握に使われるようになった。光学画像の最大の利点は、写真と同じように誰にでも分かりやすく、目視判読によって現地の状況が容易に把握できる点である。しかし、光学衛星画像の撮影はほぼ午前限定され、天候に左右されるため、災害発生後、雲の少ない画像が早期に得られない場合も多い。

40 年以上の歴史のある Landsat 衛星は、現在 8 号機が稼働中であり、マルチスペクトルバンドの解像度は 30m、回帰日数 16 日で地球上の全域を定期的に観測している。Landsat-8 によって、熊本地震発生後の 5 月 23 日に雲の少ない画像が、またその約 1 年前の 2015 年 5 月 5 日にも良好な画像が取得されている。ここでは、この 2 時期の画像を比較することにより、阿蘇の外輪山で多発した斜面崩壊の抽出を試みた。2 時期画像の赤色バンドと近赤外バンドをそれぞれ使用して、正規化植生指標(NDVI)を図 2 に示すように計算した³⁾。この指標は植物の活性度を示すもので、樹木で覆われていた斜面が崩壊して土砂が露出した場合、この値は低下する。ここでは、この 2 時期の差が 0.2 以上低下した範囲を斜面崩壊と見なして抽出した。抽出された範囲は、国土地理院などが航空写真から判読した大きな斜面崩壊を概ね捉えていることが分かる。

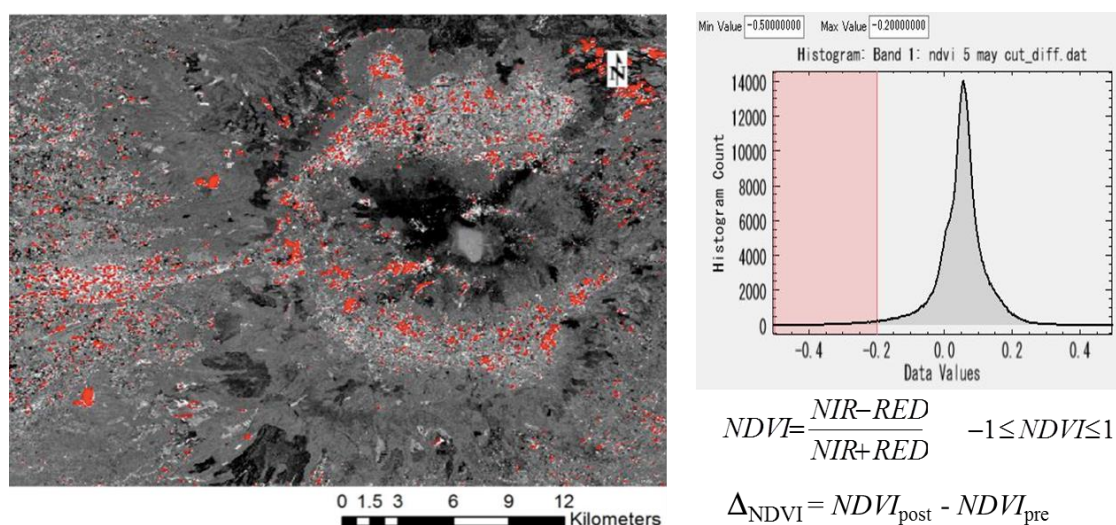


図 2 地震前後の Landsat-8 による正規化植生指標の差分から抽出した阿蘇周辺の斜面崩壊

近年、各国の宇宙機関と災害対応機関は、大災害時の衛星画像の提供に関する協定「災害国際チャータ」を締結し、観測データは当事国の緊急対応や国際救援・支援活動に利用されている。災害国際チャータのアジア・太平洋版ともいえるのが、JAXA が提唱し、2006年に発足したセンチネル・アジアである。同地域の自然災害を監視し、衛星から得た災害情報をインターネット上で共有し、災害対応に役立てることを目的としている。

熊本地震の発生に際しては「災害国際チャータ」が発動され、欧米の高分解能光学衛星が被災地域を観測した。図3は、筆者らが解析しチャータに提供した益城町総合体育館周辺の WorldView-3 衛星と Pleiades 衛星の時系列画像である。同体育館は益城町最大の避難所となっており、前震の翌朝の4月15日には避難した住民の車が集まっている。本震後の4月17日には駐車スペースが満車状態になり、この状態は4月20日も続き、体育館裏のスペースにはテントが設置されている様子が見える。このように光学衛星画像は、これまでも2004年インド洋大津波、2011年東日本大震災、2011年タイ大洪水、2015年ネパール地震など様々な自然災害において、被災地の状況を知らせてくれた。

f. Mashiki Gymnasium

益城町総合体育館

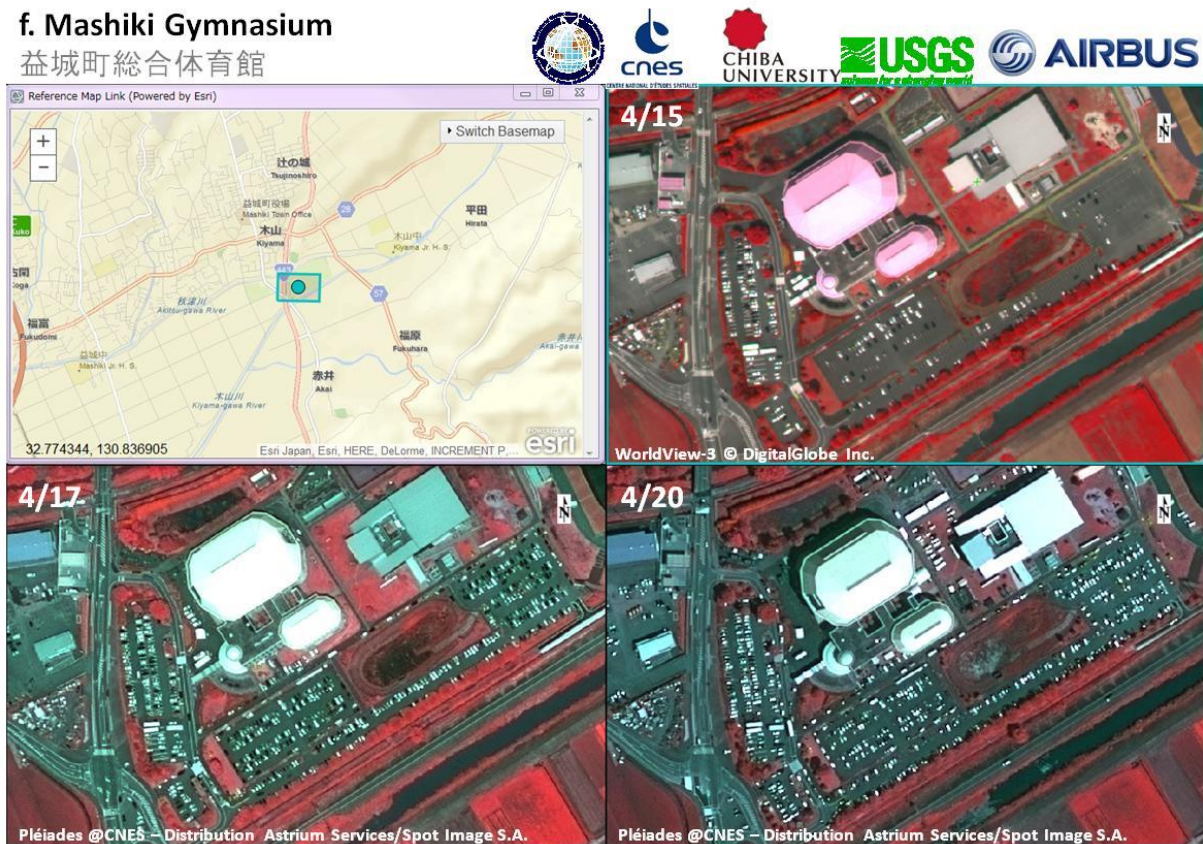


図3 災害国際チャータに提供した益城町総合体育館の時系列衛星画像⁴⁾

4. 衛星合成開口レーダ (SAR) の利用

合成開口レーダ(SAR)を用いたセンサは、マイクロ波を能動的に照射してその地球表面からの反射波を観測する機構であるため、雲などの気象条件や昼夜の時間帯などの影響を受けない特徴がある。現在稼働中の衛星 SAR は、JAXA の ALOS-2 衛星搭載の PALSAR-2、欧州宇宙機関の Sentinel-1、カナダ宇宙局の RADARSAT-2、それに商業用の高分解能衛星であるドイツの TerraSAR-X、イタリアの COSMO-SkyMed などが代表的なものである。PALSAR-2 の先代にあたる PALSAR は、2006年以降、世界各地で発生した地震、風水害、火山噴火などの災害状況を多数観測し、東日本大震災でも地殻変動量や津波被害の把握に大いに貢献した。また2014年より稼働している PALSAR-2 も、2015年口永良部島噴火⁵⁾、2015年ネパール地震、2015年関東・東北豪雨などの状況を捉えてきた。

熊本地震の前後に、影響のあった地域を頻繁に観測したのは、やはり PALSAR-2 であった。これらのデータを用いて、国土地理院は干渉 SAR 解析という手法を使って、前震、本震、さらには本震後の地殻変動の推定を行っている。筆者らも同様に、地震前（2015年11月30日、2016年3月7日）および本震直後（2016年4月18日）に同一条件で撮影された PALSAR-2 画像を用いて、地震前ペア画像と地震前後ペア画像に対して、時空間的な変動を表す「コヒーレンス」を計算し、災害国際チャータに提供した⁴⁾。図4にその分布を示すが、地震前後ペアでは斜面崩壊や建物被害などによって2時期のコヒーレンスが低下しており、この図からその様子を変化域として読み取ることができる。

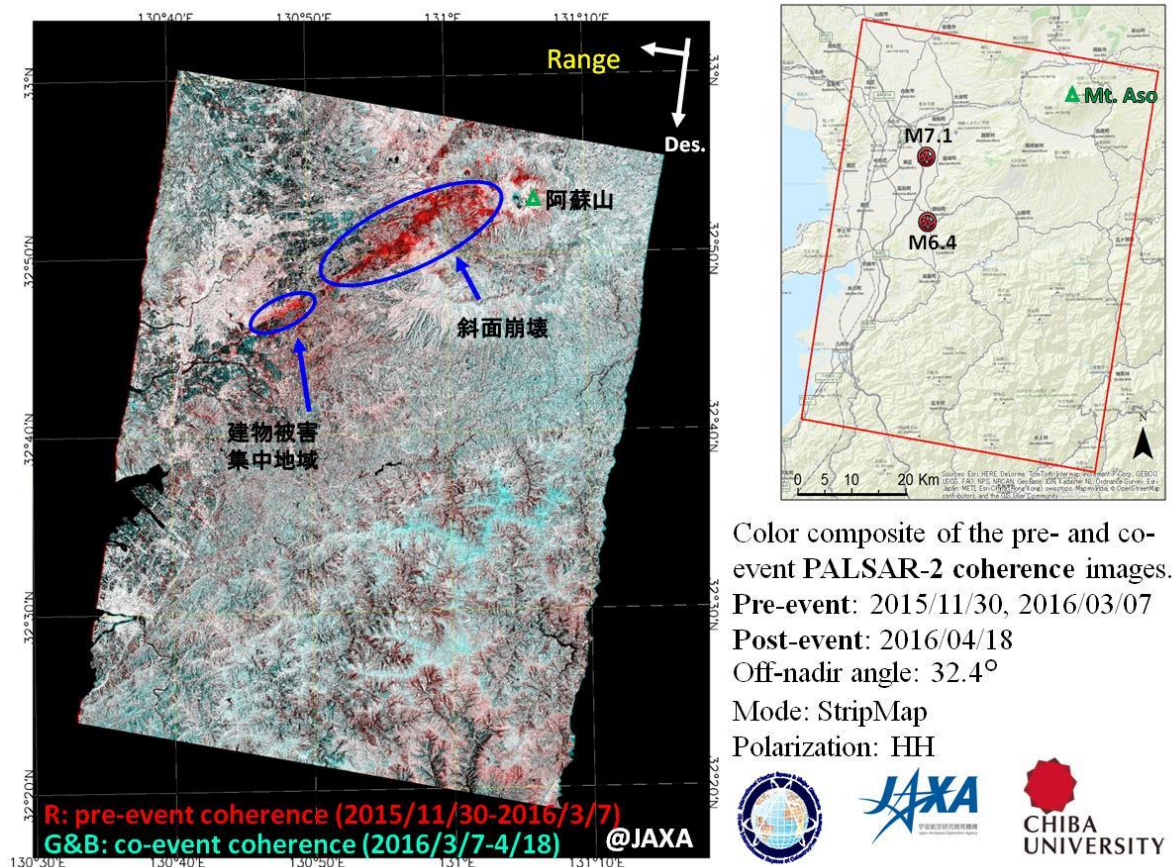


図4 災害国際チャータに提供した3時期のPALSAR-2のコヒーレンス分布

5. 航空写真の利用

航空機に搭載されるセンサからは、より高い分解能のデータを取得することができる。航空（空中）写真は、従来から写真測量や自然災害による被害把握のために用いられてきた。飛行高度1000~2000mから撮影されるため、画像の地上解像度は衛星画像を上回っている。最近では、以前のフィルムを用いるアナログ航空カメラに代わって、高性能のデジタル航空カメラが開発され、使用されるようになった。デジタル航空カメラは、輝度分解能が卓越しているため、同じ地上解像度の場合でも、アナログカメラで撮影されたものと比べると、はるかに鮮明な画像を得ることができる。また、近赤外バンドを有するために、植生の抽出に極めて便利である。また夕刻等の薄暗い時間になっても、感度が高いため空撮画像を取得できる可能性が高く、緊急撮影にも適している。

熊本地震の発生に際し、国土地理院や航測会社は、多数の航空写真撮影を行った²⁾。図5は国土地理院による垂直航空写真の撮影位置の一部（4月15日、16日撮影）を表している。この後も、地震の影響があった地域を何度も撮影し、正射（オルソ）写真も作成している。また、前震の翌日には、益城町中心部や熊本城の被害状況を把握するために、斜め写真も撮影している。これらの写真は全て、地理院地図（電子国土Web）上で公開されている。

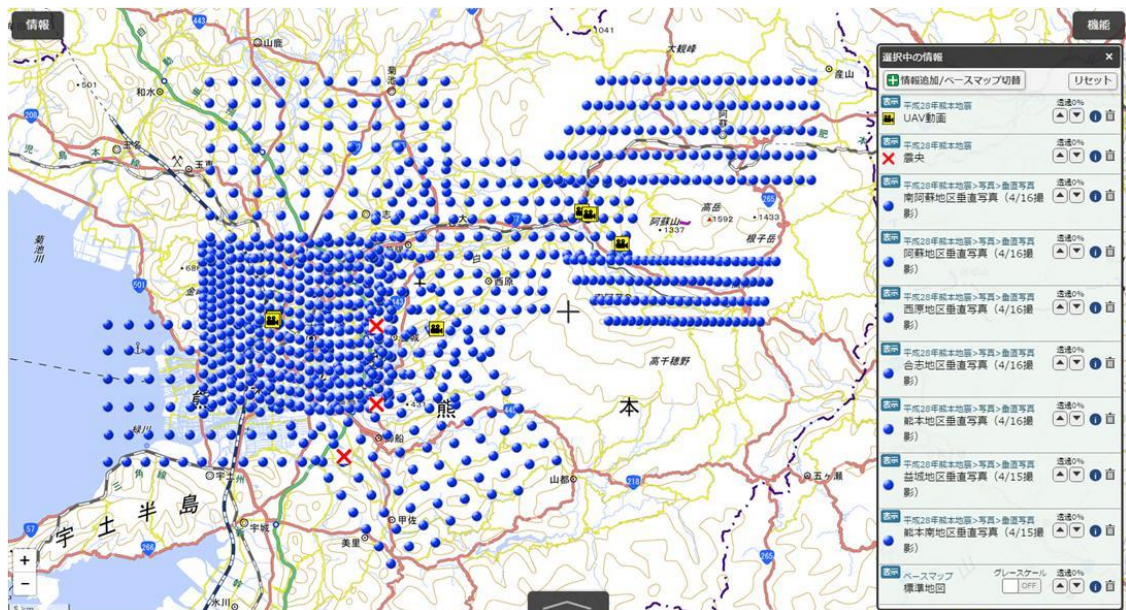


図5 国土地理院による垂直航空写真の撮影位置（●）の一部とドローン空撮地点



図6 国土地理院による正射航空写真（4月29日撮影，左：南阿蘇村河陽，右：益城町堂園）²⁾

図6に4月29日撮影の垂直写真から作成した正射写真の例を示す。南阿蘇村河陽の写真からは、阿蘇大橋を崩落させた大斜面崩壊や多数の地盤変状、倒壊したアパートも確認できる。また、益城町堂園の写真からは、図1の写真に示した地表地震断層も明瞭に確認できる。このように航空写真は被災状況の把握において、極めて有効な手段といえよう。

6. 航空レーザー計測の利用

空中からのリモートセンシング技術でもう1つ重要なものが、航空レーザー計測である。航空機にスキャン式レーザー測距儀とGPSを搭載し、地上基準局のGPS受信データと照合することで、センサ位置を求め、航空機の姿勢計測装置(IMU)によって照射方向を高精度に把握する。照射レーザー光が地表面から反射して戻ってくるまでの短い時間を計測して対地距離を求め、これらからレーザー光のフットプリント（地上測点）の位置情報（緯度、経度、標高）をデジタルデータで取得するものである。この航空レーザー計測によって取得されたデータを空間補間して作成した地表面モデルは、DSM（数値表面モデル）と呼ばれ、建物等を含む全ての地表面の位置情報デジタルデータである。一方、DSMから建物等の構造物を除去（フィルタリング）した地形モデルはDEM（数値標高モデル）と呼ばれる。国土地理院の「数値地図5mメッシュ(標高)」はこのDEMであり、このような数値標高モ

デルは、津波や洪水による浸水域予測などに極めて有用である。また、フィルタリングの過程で3次元建物モデルを構築することも可能である。

熊本地震では、国土地理院と林野庁、それに複数の航測会社が航空レーザー計測を実施している。それらのなかで本文では、アジア航測(株)が4月15日と4月23日の2回にわたって、実施した結果を紹介する⁶⁾。4月14日の地震発生の後、日奈久断層と布田川断層を含む広い範囲で、主として地震断層を確認するために航空レーザー計測を実施した。予期せずして4月16日に本震が起こり、益城町を中心とする範囲で、地表地震断層が出現したため、その後、範囲を絞って4月23日に同コース、同機体、同装置による2回目の航空レーザー計測を実施した(図7上の範囲)。

2時期の航空レーザー計測によるDSMは高い精度の空間座標を有しているので、それらを比較することで、地殻変動による水平移動量を求めることができる。ここでは100m四方のウィンドウを設定し、2時期のDSMが最大相関を示す位置を水平地殻変動量と見なすことにした。このようにしてデータ範囲全域で求めた水平移動量を差し引いて、2つのDSMの位置合わせをした後、高さの差分を取ることで、鉛直方向の地殻変動量を求めた。このようにして求めた3次元の地殻変動量を図7に示すが、現地でも観測した地表断層の分布や食い違い量、それに加速度記録の二重積分から求めた永久変位などとも良い一致を得ることができた。

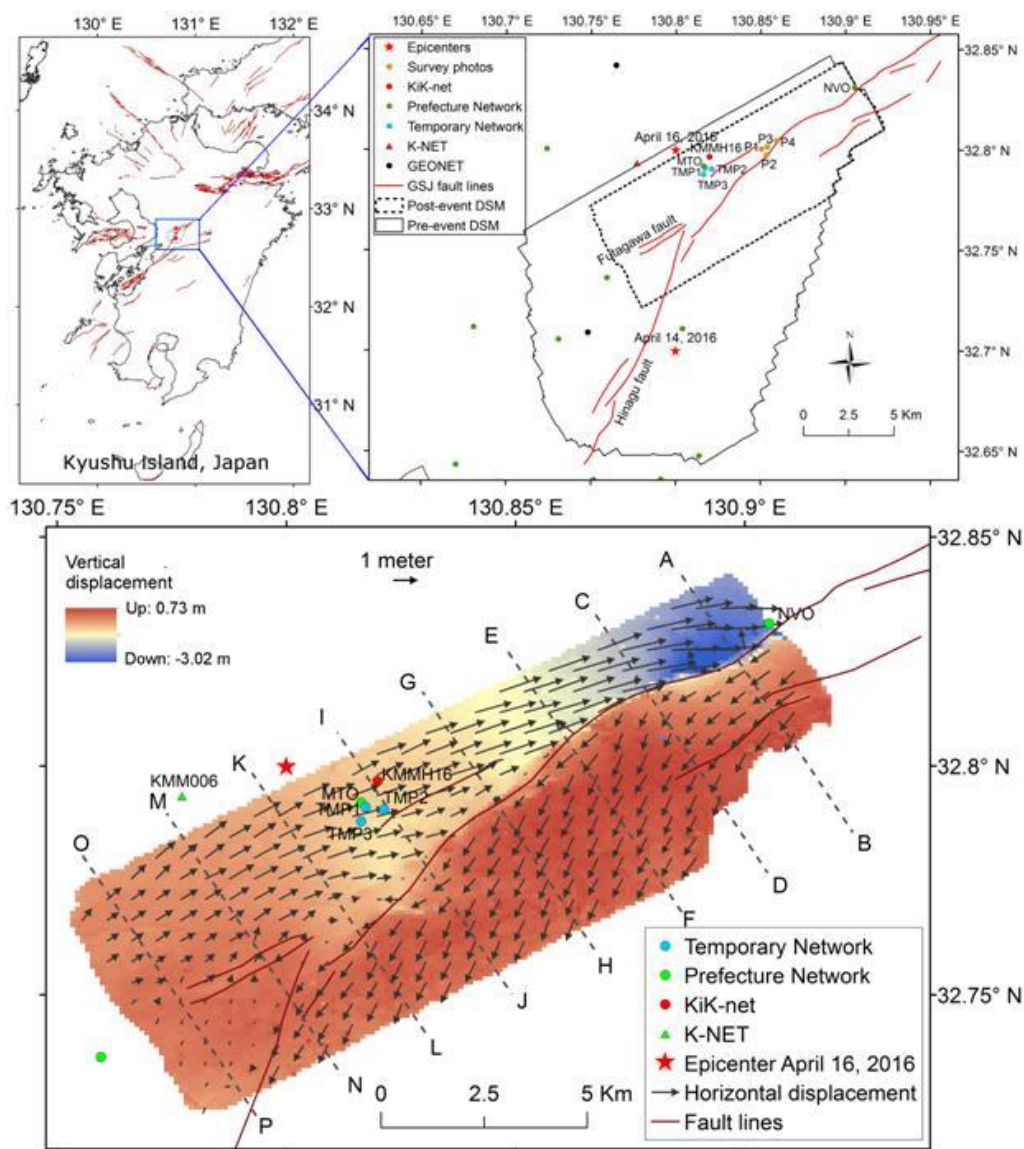


図7 アジア航測(株)による本震前後の航空レーザー計測範囲(上)と推定した3次元地殻変動量(下)

7. ドローン空撮の利用

近年、無人航空機(UAV, ドローン)の高性能化・小型化が進み、人の立ち入りが困難な箇所での効率的な情報収集手段として、様々な分野で急速に活用され始めている。災害調査における空撮では、有人機では困難な数十メートル程度の低空から高細密な画像が取得できる点や、離着陸時の機動性の高さ等から、本格的に利用されるようになった。とくに活動する火山の調査など、危険性のある現場などで多くの実績を積んできている。その一方で、ドローンが安全やセキュリティ上問題のある場所を飛行する事例が多発するようになり、ついに日本では2015年12月に航空法が改正され、人口密集地域や空港周辺などの飛行が厳しく規制されることになった。

このようなドローン規制に関する最近の情勢より、熊本地震の被災地においては、市街地のドローン空撮は基本的に行われず、国土地理院が断層や斜面崩壊、さらには熊本市と連携して熊本城の空撮を実施した。さらに被害調査の一手段として、救急医療機関、施設管理者、研究者などがアクセスが困難な中山間地域の撮影調査を実施している。

筆者らは地震発生3.5カ月後に、これまで立ち入りが規制されていた地区に対して、DJI社製ドローン Phantom 3 Professional を用いた空撮調査を実施した⁷⁾。大切畑大橋は県道28号線に架かる全長265mの5径間連続橋梁である。熊本地震によって積層ゴム支承が損傷し、桁が支承から脱落するなどの甚大な被害を受け、地震以来通行止めの状況が続いていた。現地調査では、西原村側から徒歩で橋梁を渡り、大切畑貯水池の状況を観測するとともに、大橋上からドローンを飛ばして、橋に隣接する斜面の崩壊状況などを撮影した。ドローンから撮影した高分解能静止画の例を図8(a, b)に示す。

また近年、SfM (Structure-from-Motion) と呼ばれるテクスチャを持つ3次元モデル構築手法の利用が広がっている。SfMでは、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、3次元幾何形状とカメラの位置を同時に算出する。この技術を適用して3Dモデル化することで、オルソ画像や数値表層モデル(DSM)などの細密な地形情報の取得が可能となった。

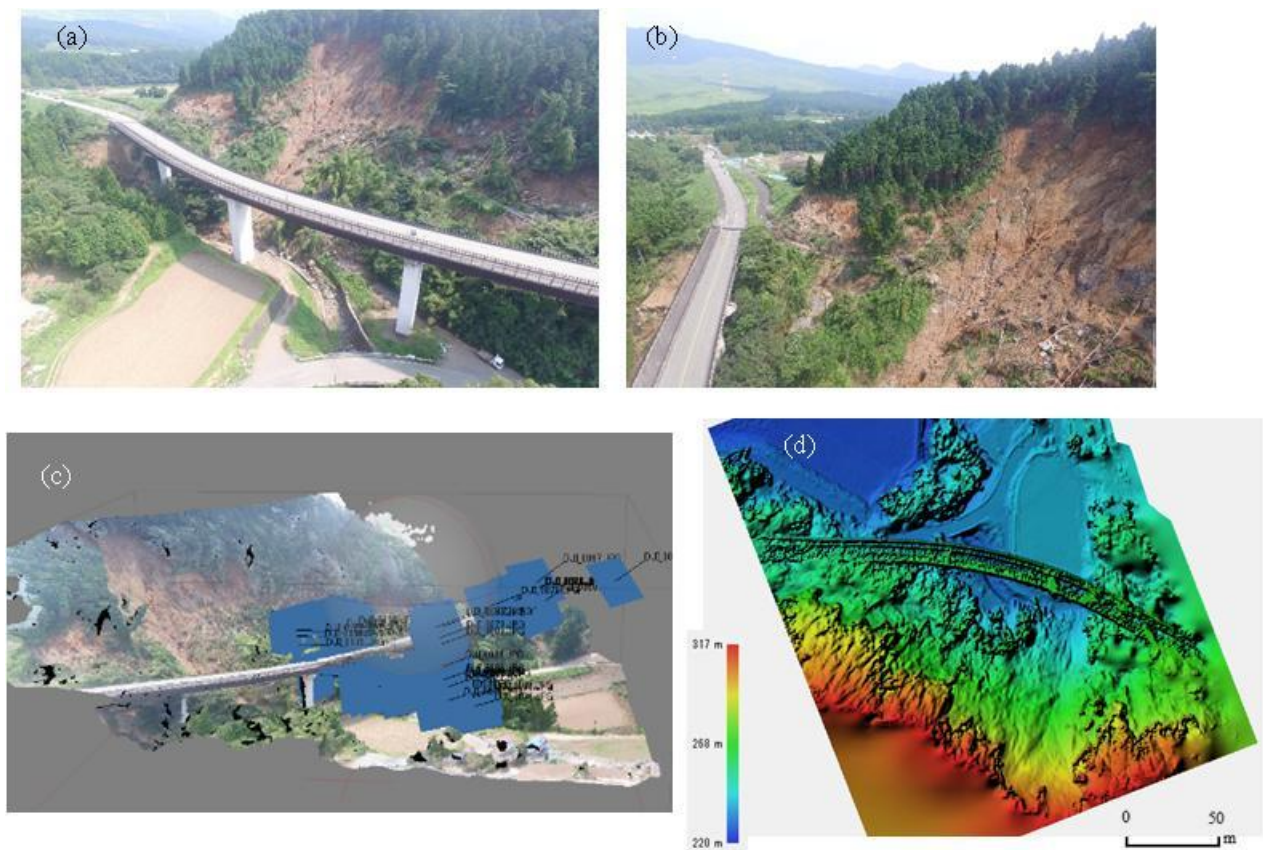


図8 西原村大切畑大橋周辺のドローンによる空撮⁷⁾。(a), (b)空撮画像, (c)SfMで構築した3Dモデルと推定カメラ位置, (d)大切畑大橋を含む周辺斜面のDSM

筆者らはこの手法を大畑大橋周辺を撮影した合計 51 枚の静止画像に適用した。構築した 3D モデルとカメラ姿勢情報を(c)に、数値表層モデル(DSM)を(d)に示す。この観測では静止画撮影を行ったため、機体搭載の GPS データも取得され、カメラ位置の探索の初期値として利用できた。有人機より撮影された写真に比べ崩壊斜面に接近できるため、地形の変化や植生の様子を観測しやすい。また、DSM により斜面の上方から下方に向けて、土砂が流出している様子を確認できる。このようにドローンは、災害時におけるアクセス困難地域の情報把握に有効な手段といえよう。

8. おわりに

リモートセンシング技術の防災分野における利用について、最新の動向を紹介した。衛星搭載の光学センサや合成開口レーダ(SAR)に関しては、高分解能化やセンサのポインティングによる撮影機会の増大が大きな流れといる。航空写真に関してはデジタル航空カメラが普及し、高い輝度分解能や機動性などの特徴が利用を広げている。また、航空レーザー計測によって、高精度の数値表層モデル(DSM)を取得することができるようになった。さらに最近、様々な分野で小型ドローンの利用が爆発的に普及してきたが、航空法の改正により市街地などでは規制されるようになった。

次に、2016 年 4 月に発生した一連の熊本地震におけるこれらのリモートセンシング技術の利用事例を紹介した。衛星センサは広域における地殻変動や被害分布、それに避難所に集まる車両などの人間行動の把握も可能になった。航空写真や航空レーザー計測は、被災地域の被害や地殻変動の詳細な面的分布も捉えることができた。さらに小型ドローンが、アクセス困難な被災個所の詳細状況の把握や 3 次元計測に利用された。

今後も、我国を含む世界各地で自然災害が発生するであろう。急速に進歩するリモートセンシング技術をこれらの災害対応にいかにも有効に利用するかが、我々に与えられた課題といえよう。

参考文献

- 1) 気象庁：平成 28 年（2016 年）熊本地震の関連情報
http://www.jma.go.jp/jma/menu/h28_kumamoto_jishin_menu.html
- 2) 国土地理院：平成 28 年熊本地震に関する情報
<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html>
- 3) Yamazaki, F., Liu, W.: Remote sensing technologies for post-earthquake damage assessment: A case study on the 2016 Kumamoto earthquake, 6th Asia Conf. on Earthquake Eng., 2016.
- 4) 災害国際チャータ Space and Major Disasters: Earthquake in Japan
<https://www.disasterscharter.org/web/guest/-/earthquake-in-jap-1>
- 5) 原香実, リュウ・ウエン, 山崎文雄：ALOS-2 衛星画像を用いた口永良部島の火山活動モニタリング, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 36, No. 4, pp. 338-347, 2016.
- 6) アジア航測株式会社：「平成 28 年熊本地震」災害状況 第二報
<http://www.ajiko.co.jp/article/detail/ID56JI45Y2D/>
- 7) 久保佳澄, 田邊諒士, 山崎文雄：UAV 空撮による 2016 年熊本地震の被害把握と 3 次元モデル作成, 第 61 回学術講演会論文集, 日本リモートセンシング学会, 2016.



山崎文雄 YAMAZAKI, Fumio
千葉大学 大学院工学研究科 教授
〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33