

総論 地震防災におけるリモートセンシングの最新動向

山崎 文雄

●千葉大学大学院工学研究院 教授

1. はじめに

リモートセンシングは、光、熱放射、電波などを観測するセンサを用いて、宇宙や空中から地表、海洋、大気の状態を把握する技術である。とくに人工衛星による陸域観測に関しては、従来は空間分解能が最大20-30m程度であったため、観測データは資源探査や環境把握などに使われていた。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、湛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。

阪神・淡路大震災以降、リモートセンシングの地震防災分野の利用が拡大しているのは、最近の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（合成開口レーダ：SAR）、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ている。また、センサが観測対象地域に向きを変える機能が付いたために、災害の観測頻度が大幅に向上した。全天候型のSARを搭載した衛星が増えたことも、利用拡大の一因といえる。一方、プラットフォームとしては、無人航空機（ドローン、UAV）の進化と利用拡大が目覚ましい。

本文では、2016年熊本地震における実利用事例¹⁾を通して、リモートセンシングの防災分野における最新動向と今後の展開について考えてみる。

2. 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-1.4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。近年の大規模災害では、発災直後より各種の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、目視によって状況が容易に把握できる点である。しかし、光学画像の撮影は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ことも多い。

45年の歴史のあるLandsat衛星は、現在8号機が稼働中である。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2016年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た。この上記の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使用して、正規化植生指標（NDVI）を図1に示すように計算した¹⁾。NDVIは植物の活性度を示す指標で、樹木で被覆された斜面が崩壊し土砂が露出した場合、この値は低下する。ここでは、地震後に値が0.2以上低下した範囲を斜面崩壊と見なして抽出した。抽出範囲は航空写真と比較して、大きな斜面崩壊を概ね捉えている。

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的な救援・支援活動に利用されている。また、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。

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2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

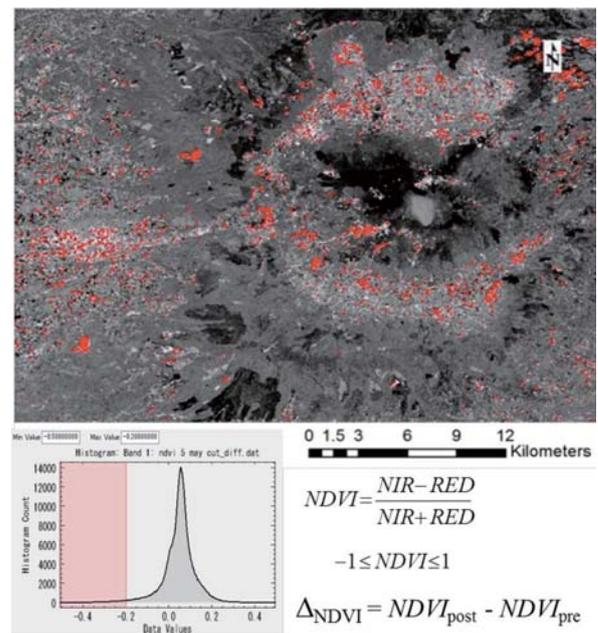


図1 Landsat-8画像による阿蘇山周辺の斜面崩壊¹⁾

列画像である²⁾。当時、同体育館は益城町最大の避難所となっており、前震翌朝の4月15日には、避難者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、体育館裏には被災者対応のテントが設置されている。このように高分解能光学衛星画像は、これまでも2004年スマトラ沖地震、2008年中国・四川地震、2010年ハイチ地震、2011年東日本大震災、2015年ネパール地震などにおいて、被災地の状況を伝えてくれた。



図2 益城町総合体育館周辺の時系列衛星画像²⁾

3. 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仕組みであり、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、カナダのRADARSAT-2、それに商業用高分解能衛星のドイツのTerraSAR-X、イタリアのCOSMO-SkyMedなどが代表的なものである。PALSAR-2の先代のPALSARは、2006年以降、世界各地の地震、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や津波被害の把握に貢献した。2014年より稼働しているPALSAR-2も、2015年口永良部島噴火、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³⁾。

熊本地震の前後に、被災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解析により、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⁴⁾。筆者らも、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による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。図3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、その様子がカラーの原図からは、赤色の変化域として判読できる。

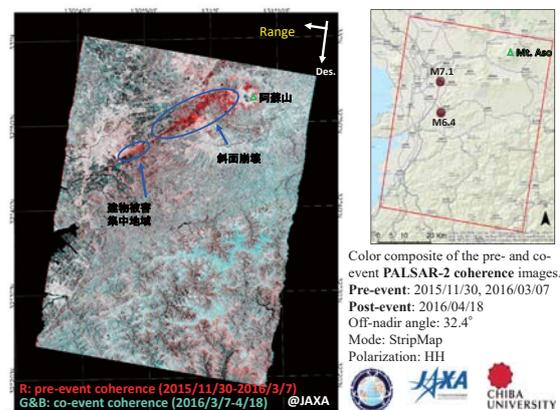


図3 3時期のPALSAR-2のコヒーレンス分布²⁾

4. 航空写真と航空レーザー計測の利用

航空機搭載センサからは、衛星より高い解像度のデータを取得することができる。航空写真は、従来から写真測量や災害把握に用いられてきた。飛行高度1000～2000mから撮影されるため、解像度は衛星画像を上回る。最近では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。これは輝度分解能が卓越しており、アナログ航空写真と比べて、はるかに鮮明な画像が得られる。また近赤外バンドも有するために、植生や水面の抽出にも便利である。また夕刻等の薄暗い時間帯でも画像を取得でき、緊急撮影にも適している。熊本地震の発生に際して、国土地理院や航測会社は多数の航空写真撮影を行い⁴⁾⁵⁾、結果は斜面崩壊、地表断層、建物被害などの判読に利用されている。

空中からのリモートセンシングでもう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地上測点の位置情報(緯度、経度、標高)を取得する仕組みである。航空レーザー計測で取得されたデータを補間した地表面モデルは、DSM(数値表面モデル)と呼ばれ、建物等を含む地表面の位置情報である。一方、DSMから建物や樹木を除去(フィルター)したものは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、浸水域予測などに利用される。

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た。なかでもアジア航測(株)は4月14日の地震発生後、日奈久断層と布田川断層を含む広い範囲で、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⁵⁾。予期せずして4月16日に本震が起り、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、同パイロットによる2回目の航空レーザー計測を実施した⁵⁾。

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ため、それらを比較することで地殻変動量を求めることが可能である。筆者らは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。こうして求めた水平移動量を差し引いた後、2つのDSMの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⁶⁾。得られた3次元の地殻変動量を図4に示すが、現地観測した地表断層の分布や食い違い量、加速度記録の二重積分から求めた永久変位、国土地理院による測量結果などとも良い一致が得られた。

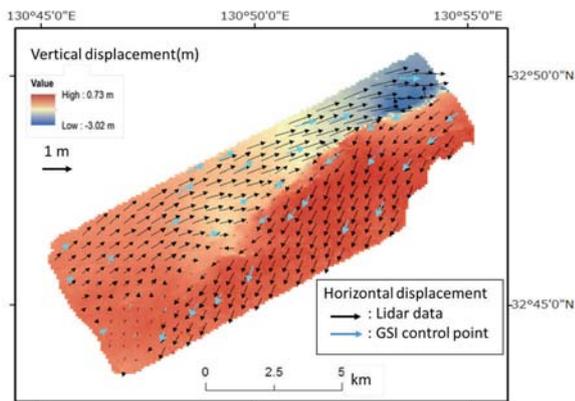


図4 本震前後の航空レーザー計測データ⁵⁾から推定した3次元地殻変動量⁶⁾

5. 航空機SARの利用

航空機搭載の合成開口レーダ(SAR)は、運用が国内に限定されるものの、緊急時に即座に観測することが可能なこと、観測方向や入射角を自由に選べること、さらには衛星SARよりはるかに高い分解能のデータが取得可能などの利点を有する。我国では、同じ航空機を使用して、JAXAが波長の長いLバンド、情報通信研究機構(NICT)がより波長の短いXバンドの航空機SARを運用してきた。航空機SARは同じ観測条件での事前画像を準備することが困難な半面、4偏波での観

測が一般的であるため、1時期の画像からでも建物や橋梁などの構造物を認識したり、地表面の状態を推測したりすることが可能である。

NICTは、XバンドのPi-SAR2を熊本地震直後の4月17日に飛行させ、阿蘇地域の斜面崩壊や益城町の建物被害を観測した⁷⁾。図5は益城町中心部における散乱行列を4成分分解⁸⁾したカラー合成図であるが、平坦な道路が暗く、レーダ照射方向にほぼ垂直に立ち並んだ建物において、2回反射散乱(Pd)と体積散乱(Pv)が強くなっている様子を見ることができる。このような緊急観測データを取得することにより、航空機SARは地震被害状況の把握に役立つことが期待される。

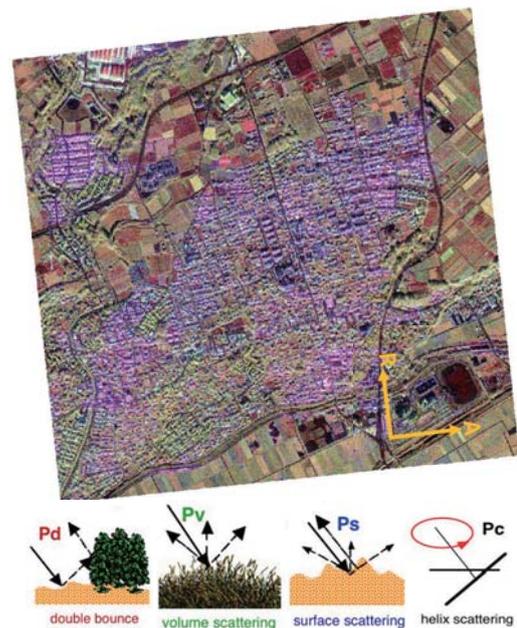


図5 Pi-SAR2による益城町中心部の散乱分解画像

6. ドローン空撮の利用

近年、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。災害調査においては、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。活動中の火山調査など、危険性のある現場等で多くの実績を積んでいる。一方で、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し、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た。

このような状況により、熊本地震で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。また、救急医療機関、施設管理者、研究者などが、アクセス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、DJI社製のPhantom 3 Professional を用いた空撮調査を実施した⁹⁾。大切畑大橋(西原村)は県道28号線に架かる全長265mの5径間連続橋梁である。熊本地震により積層ゴム支承が損傷し、桁が支承から脱落するなどの被害を受けた。現地調査でドローンにより、橋梁や隣接斜面の崩壊状況などを撮影した(図6)。また近年、SfM (Structure-from-Motion) と呼ばれる3次元モデル構築法の利用が広がっている。SfMでは、カメラ視点を変えながら撮影した複数枚の画像から、対象物の3次元幾何形状とカメラ位置を同時に算出する。この技術を適用して、正射投影画像やDSMなどの細密な情報取得が容易となった。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おいて、極めて有効な手段といえよう。



図6 大切畑大橋周辺のドローン空撮画像⁹⁾

7. おわりに

リモートセンシングの地震防災分野における利用について、最新の動向を紹介した。また、2016年4月に発生した一連の熊本地震における利用事例を示した。衛星センサからは、広域における地殻変動や被害分布、さらには人間避難行動の把握までも可能になった。航空写真や航空レーザー計測からは、構造物被害や地殻変動の詳細な面的分布も捉えることができる。航空機SARは市街地の地震被害の把握に利用可能なこと、さらに小型ドローンは、アクセス困難な被災個所の詳細な状況把握に利用されるようになった。

今後も、我国を含む世界各地で地震などの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より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) Yamazaki, F., Liu, W.: Remote sensing technologies for post-earthquake damage assessment: A case study on the 2016 Kumamoto earthquake, 6th Asia Conference on Earthquake Engineering, 2016.
- 2) Space and Major Disasters: Earthquake in Japan: <https://www.disasterscharter.org/web/guest/-/earthquake-in-jap-1> (閲覧2017.12.12)
- 3) JAXA : ALOS解析研究プロジェクト. http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/index_j.htm (閲覧2017.12.12)
- 4) 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> (閲覧2017.12.12)
- 5) アジア航測(株) : 平成28年熊本地震災害状況 第二報. <http://www.ajiko.co.jp/article/detail/ID56JI45Y2D/> (閲覧2017.12.12)
- 6) Moya, L., Yamazaki, F., Liu, W., Chiba, T.: Calculation of coseismic displacement from lidar data in the 2016 Kumamoto, Japan, earthquake, Natural Hazards and Earth System Sciences, 17, pp. 143-156, 2017.
- 7) 情報通信研究機構 (NICT) : Pi-SAR2による熊本地震の被災地観測、<http://www2.nict.go.jp/res/kumamoto-earthquake/index.html> (閲覧2017.12.12)
- 8) 山口芳雄 : レーダポーラリメトリの基礎と応用 - 偏波を用いたレーダリモートセンシング -, 電子情報通信学会, 2007.
- 9) 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、日本リモートセンシング学会第61回学術講演会、2016.



山崎 文雄 (やまざき ふみお)

1978年東京大学大学院修了、清水建設(株)大崎研究室、東京大学助教授、アジア工科大学院(AIT)教授を経て現職、工学博士、専門分野：地震工学、都市防災、ライフライン工学、防災リモートセンシング。