

日本地震工学会誌

Bulletin of JAEE

No.33

Feb.2018

特集：ここまで見える！ リモートセンシングが拓く防災の新たな地平



<http://www.jaee.gr.jp/>

公益社団法人 日本地震工学会

Japan Association for Earthquake Engineering

〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館

Tel:03-5730-2831 Fax:03-5730-2830

日本地震工学会誌 (第33号 2018年2月)

Bulletin of JAEE (No.33 Feb.2018)

INDEX

巻頭言：

特集「ここまで見える！ リモートセンシングが拓く防災の新たな地平」／平田 京子 …………… 1

特集：ここまで見える！ リモートセンシングが拓く防災の新たな地平

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 …………… 2
建物被害把握への適用について／三浦 弘之 …………… 6
災害調査のための3次元モデルの活用／望月 貫一郎 …………… 10
地盤災害調査への適用／小長井 一男 …………… 14
リモートセンシングによる液状化被害の広域把握／松岡 昌志 …………… 19
リモートセンシング技術の進展によって変わりつつある活断層像／遠田 晋次 …………… 22
リモートセンシングによる津波の広域被害把握／越村 俊一 …………… 26

特別寄稿：

メキシコ中部地震によるメキシコシティの被害概要／清田 隆 …………… 30

学会ニュース：

日本地震工学会・大会-2017報告／秋山 充良 …………… 32
第3回メディア交流会の報告／宮腰 淳一 …………… 36
「強震動評価のための表層地盤モデル化手法」講習会 開催報告／津野 靖士 …………… 37
「強震動評価のための表層地盤モデル化手法」講習会 参加記／堀 愛里香、河合 亮太 …………… 38

学会の動き：

本学会に関する詳細はWeb上で／会誌への原稿投稿のお願い／登録メールアドレス確認のお願い
／お知らせ …………… 39

編集後記

特集「ここまで見える！ リモートセンシングが拓く 防災の新たな地平」

平田 京子

●日本女子大学 教授

1. はじめに

2018年が始まってから最初の号をお届けします。

創立から18年を迎える日本地震工学会。人間で言えば青年期を迎えている年、成熟した会をめざして今年も疾走する本会となるでしょう。会の疾駆を支え、会員同士をつなぐ媒体としての会誌を今年もどうぞよろしくお祈りします。

また最近ではさまざまなメディア、デジタルツールが存在し、情報を得ることの価値はいつそう高まっていますが、その反面、会誌がどのくらいタイムリーであればいいのか、雑誌としてどのような価値をもつべきなのか、どのような形式で発行されるのが望ましいのか、それらを考慮しつつ編集を行っております。皆さんとともに作る会誌をめざし、いつでも皆さんのご意見をお待ちしております。

2. 特集解題

今号の特集は、「ここまで見える！ リモートセンシングが拓く防災の新たな地平」としました。リモートセンシング技術は観測精度の向上や計算機・ネットワーク技術の高度化に伴って飛躍的に発展し、資源探査・地球環境問題・災害調査など多くの分野で利用されています。特に対象を遠隔から観測するという性質上、危険地域を広範囲にわたって調査することが可能であり、地球科学的調査や災害調査において有力な手段となっています。そこで地震工学・防災におけるリモートセンシングの最新動向、今後の展開などを紹介します。

本誌の特集では、総論に該当する記事を設けることは少ないのですが、今号では特にリモートセンシングの総論と最新動向について山崎文雄先生に執筆をお願いし、まず全体の骨格を固めました。この原稿の図はどれもカラーで色彩も大変美しいのですが、モノクロ印刷の雑誌ではそれをお見せできないのが残念です。冊子版の刊行と同時に学会ウェブサイトで公開されるオンライン版(1年間は会員限定)のPDFファイルでカラーになった図をご堪能ください。

宇宙や航空、衛星、ドローンといった大人も子どももわくわくするようなキーワードがちりばめられ、躍動的でリアルタイム、ダイナミックでインパクトある

リモートセンシングの世界が解説されています。

続いて、知りたい分野に関するテーマごとに構成し、次のような原稿が集まりました。

- ・建築物の被害
- ・土木(インフラストラクチャー)の被害
- ・土砂災害
- ・液状化を含む地盤災害
- ・活断層
- ・津波浸水域

たとえば今年1月23日に噴火した草津白根山の噴火口など、人が容易に近づけない現場で状況を的確に把握するにはコストと労力がかかりますが、地震被害を迅速に把握する、そして復興を加速させる最先端技術の大きな可能性を感じずにはいられませんでした。

多くの写真原稿をフルカラーで提供頂いており、原稿を見ている編集委員の私達にはインパクトのある世界が広がっています。これも雑誌では残念ながら白黒ですが、ぜひオンライン版をご覧ください。それらは美しい写真というだけでなく、数枚の写真やその合成によって被害程度の数量化や統計データが算出されることにもさらっと触れていて、画像が開く新しい世界観にドキドキするような緊迫感が感じられます。

また2017年9月に発生したメキシコの地震の速報や、2017年度大会など学会の活動に関するニュースを掲載しているので、ぜひ見逃さずにご覧ください。



平田 京子(ひらた きょうこ)

1990年 日本女子大学大学院修了、日本女子大学家政学部住居学科教授、博士(学術)、専門分野は市民防災、避難所運営、被災者の生活復興、リスクコミュニケーション

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、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

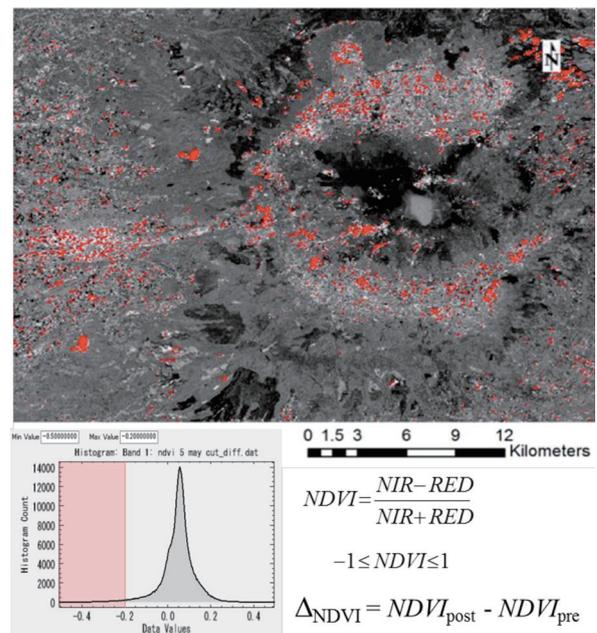


図1 Landsat-8画像による阿蘇山周辺の斜面崩壊¹⁾

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。

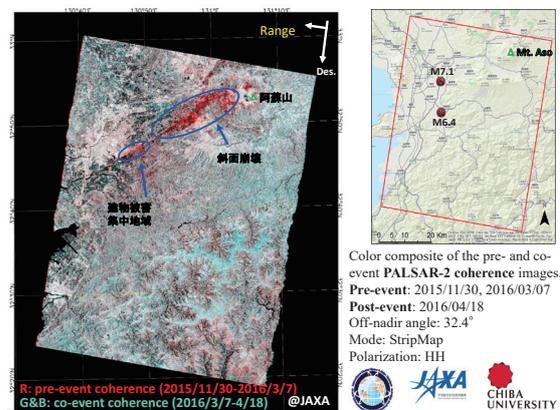


図3 3時期のPALSAR-2のコヒーレンス分布²⁾

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。

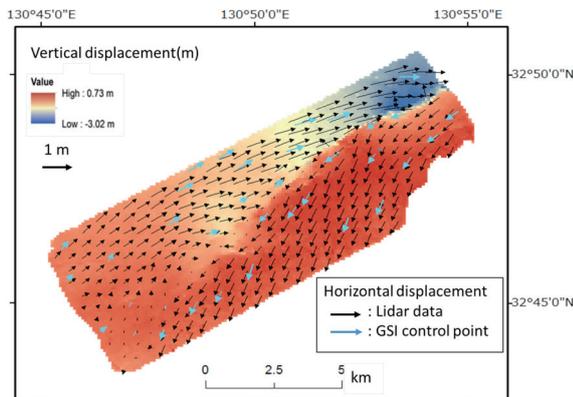


図4 本震前後の航空レーザー計測データ⁵⁾から推定した3次元地殻変動量⁶⁾

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。

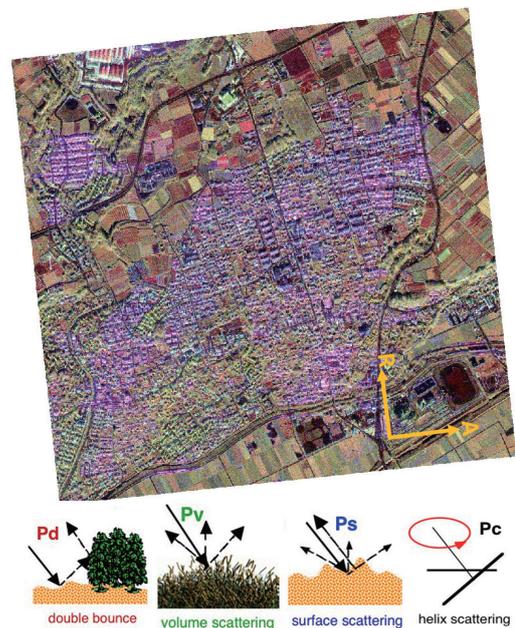


図5 Pi-SAR2による益城町中心部の散乱分解画像

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。

建物被害把握への適用について

三浦 弘之

●広島大学 大学院工学研究科 建築学専攻 准教授

1. はじめに

大地震等の災害で発生する各種被害のうち、建築構造物の被害は件数が多く、人命に直接関わる被害であるため、その被害分布と被害量を迅速に把握することは、災害後の応急対応や早期復旧計画を立案する上で非常に重要である。個々の建物の詳細な被害状況を把握するには、もちろん現地調査が必要となるが、労力・時間を要するため、広域災害での建物被害分布を短時間で把握することは困難である。そこで、一次的な建物被害情報を収集するには、リモートセンシングを用いた方法が有効となる。

本稿では、リモートセンシング技術が建物被害の把握に利用されるようになった経緯を簡単に振り返るとともに、光学センサ画像や合成開口レーダ (SAR) 画像を用いた建物被害の把握技術を紹介する。

2. 地球観測衛星リモートセンシングについて

地球を観測するリモートセンシング技術は1960年代に始まり、1972年に打ち上げられたLandsat衛星による画像データは、災害把握だけでなく様々な地球環境のモニタリングに利用されてきた。しかし、リモートセンシングが個々の建物レベルの被害の把握に本格的に利用されるようになったのは、1999年の米国でのIKONOS衛星の打ち上げ以降であろう。IKONOSは、冷戦時代に培われた偵察衛星技術が民生転用されて以来、初めて打ち上げられた人工衛星であり、それまでの衛星画像の地上分解能は10～30m程度であったのに対して、分解能1mという非常に高解像度な画像が一般に使用できるようになった。

図1はある被災地を撮影した分解能0.2mの航空写真から擬似的に1m、30m分解能の画像を作成し、比較したものである。30m分解能の画像では、建物や道路の位置を把握することはできないのに対して、1m分解能の画像では、建物の位置や形状を把握することが可能であることがわかる。0.2m分解能画像に比べると情報は限られており、単独の画像で被害の有無を正確に判定することは難しいが、地震前に撮影した画像と比較を行えば、建物の形状や色の変化からある程度の被害の有無の判別は可能である。このような背景から、高分解能なリモートセンシング画像による建物被害の

把握に関する研究が、今世紀以降本格的に始まることとなった。IKONOSの打ち上げ以降、高分解能な光学センサを有するQuickBird (分解能0.6m)、GeoEye-1 (分解能0.5m)、WorldView-2 (分解能0.5m) 等の人工衛星が打ち上げられ、地図作成や災害監視など幅広く利用されている。

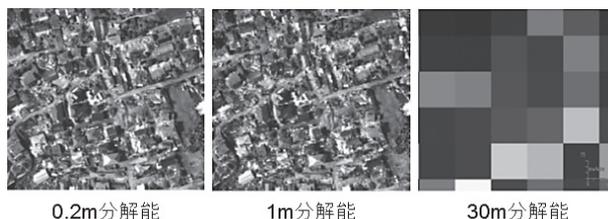


図1 各分解能の画像での建物の様子

光学センサでは夜間や雲がかかった地域の地表を観測することはできない。一方で、SARはレーダを能動的に照射し、地表で反射して戻ってきたレーダを画像化するもので、雲を透過できることから、夜間や悪天候時にも観測可能であり、早期災害対応には有効である。光学画像と同様に、従来のSAR画像の分解能は数10m程度であったが、2007年ドイツのTerraSAR-XやイタリアのCosmo-SkyMedの打ち上げにより、1m程度の高分解能なSAR画像が利用できるようになった。わが国が打ち上げたALOS-2衛星にもSAR (PALSAR-2) が搭載されており、様々な災害観測に利用されている。

以降では、光学センサ画像およびSAR画像を用いた建物被害の把握技術について述べる。

3. 光学センサ画像による建物被害把握

3.1 目視判読による被害把握

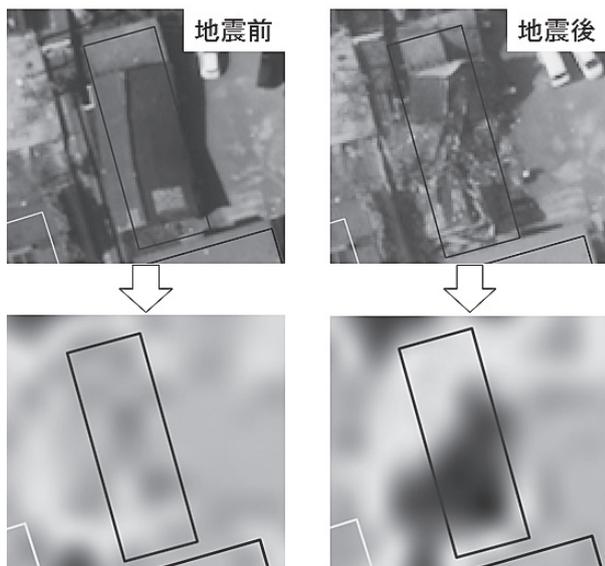
人間の目による判読は最も簡単であることから、1995年兵庫県南部地震以降、様々な地震災害に対して、航空写真やヘリコプター映像、人工衛星画像を用いた建物被害の目視判読が実施され、現地調査との比較からその判読精度が議論されてきた^{例えば1)}。これらの結果から、倒壊や大破などの甚大な被害は比較的精度良く判読できるものの、中程度の被害は建物側面や内部で発生することから、真上からの画像では判読が困難となることが明らかにされている。現在のところ目視判読は最も信頼性の高い方法であることから、災害時

の早期被害把握では、航空写真等の目視判読が広く利用されている。しかし、目視判読は多大な労力と時間を要し、例えば2016年熊本地震時には約28万棟の建物被害の判読に延べ150名、約50時間の作業量を要した。このような労力を軽減し、短時間で被害把握を行うには、画像処理技術を適用して自動・半自動的に結果を得ることが望ましい。

3.2 画像処理による被害把握

一般に、建物が被害を受けると、屋根や壁のがれきが周囲に散乱する。このような建物の変化は、画像上では色やテクスチャの変化として現れる。地表分解能2m程度までの画像の場合、個々の建物のテクスチャを判別することは難しいことから、主に地震前後の画像の色や輝度の変化から被害の有無を判別することが多い。1995年兵庫県南部地震では、分解能30mのLandsat/TM画像の輝度値の変化から被害地域の推定が行われている²⁾。また、海外で多く見られる組積造建物では、がれきが多く散乱し、屋根との輝度の差が明瞭に現れることから、単純な地震前後の輝度値の差分でもある程度の被害を把握することが可能である³⁾。

地表分解能1m以下の高解像度な画像の場合、建物のがれきが散乱する様子を画像のテクスチャの変化としてとらえることが可能となる(図2)。健全な建物の屋根面では比較的均質な色や明度の画素が分布しているのに対して、がれきでは小規模な物体が散乱するために、明るい画素と暗い画素が互いに隣接して分布することとなる。このようなテクスチャの違いを評価する



画素の乱雑さ(テクスチャ)を表す分布=がれき箇所が高い

図2 地震前後の光学センサ画像における倒壊建物とテクスチャ(異質度)分布

方法として、同時生起行列による異質度を用いる方法が提案されている⁴⁾。2016年熊本地震での画像に対する解析結果(図3)からも、この方法が倒壊・大破した建物の検出にある程度有効であることが示されている⁵⁾。

ただし、地震前後の光学センサ画像の自動処理に関しては、撮影画像間の太陽光や撮影角度、大気の状態の違い、植生や影の影響を完全に取り除くことが難しいことが課題として挙げられる。

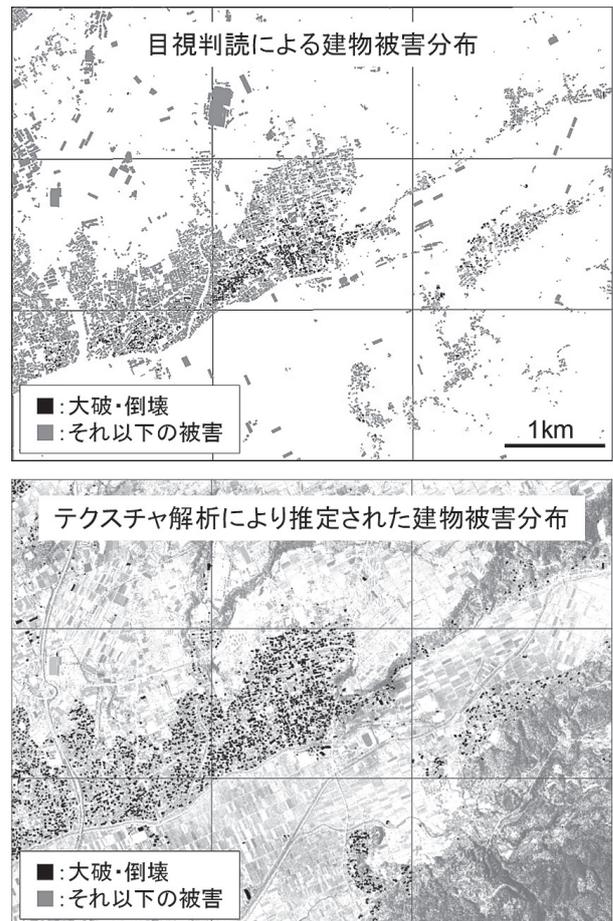


図3 2016年熊本地震での航空写真の目視判読による建物被害分布とテクスチャ解析により推定された被害分布^{5)に加筆}

4. SAR画像による建物被害把握

SAR画像は地表からのレーダの反射を画像化したもので、光学画像のように目視で地物を認識することは難しい。しかし、反射強度という物理量を観測できること、大気の影響を受けにくいこと、ほぼ同角度で撮影していることから、画像解析による処理に適している。主なSAR画像解析方法として、干渉SARでは数cmオーダでの地表変動の検出が可能であり、地震による地殻変動の把握などに役立てられている。建物被害の把握に関しては、SAR強度画像を用いた方法⁶⁾が広く

利用されている。この方法は、健全な建物では壁面でレーダが強く反射するのに対して、被害建物ではがれき箇所ではレーダが散乱するために、反射強度が弱まるという特徴(図4)を利用して、地震前後の強度の差分や相関係数の変化から建物被害地域を検出する方法である。数10m程度の分解能の画像に対する適用例が多いが、1m程度の高分解能SAR画像に対しても、適用可能であることが示されている⁷⁾。

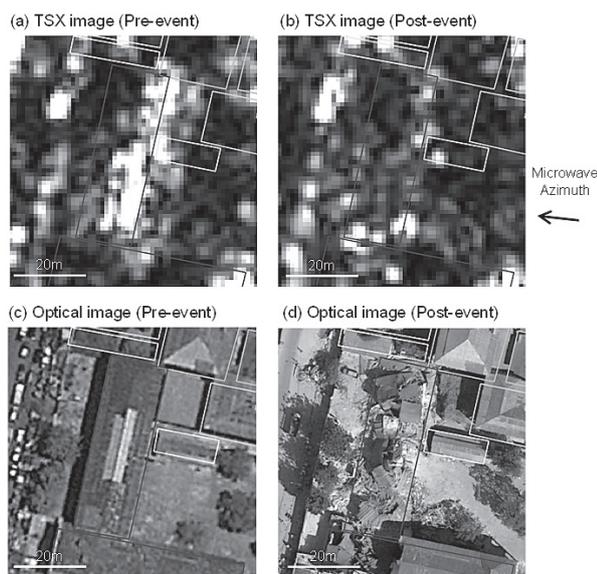


図4 高分解能SAR画像と光学センサ画像による倒壊建物の様子⁷⁾

また、地震以外での変化による誤検出を軽減するために、地震後即時に得られる地震動強さ分布から建物被害関数を介して推定される建物被害率との統合処理(図5)によって、建物被害分布把握の精度向上および不確定性の低減を目指した検討も行われている⁸⁾。このような統合処理は、いわゆる地震工学的な知見とリモートセンシング技術の融合であり、境界領域である地震工学ならではの非常に有効である。今後SAR画像のみならず、光学センサ画像に対しても同様な統合モデルの構築を検討するべきであろう。

5. 人工知能技術の応用

2012年に開催された画像認識に関するコンテストや学術誌で、人工知能技術の一つである深層学習モデルのうち、多層ニューラルネットワークを利用することで非常に高い精度で物体を認識できると発表されて以来、画像認識のみならずリモートセンシングの分野でも深層学習による地物の認識に関する検討が数多く始められた。深層学習技術の中でも畳込みニューラルネットワーク(以下、CNN)が画像認識では最も有効

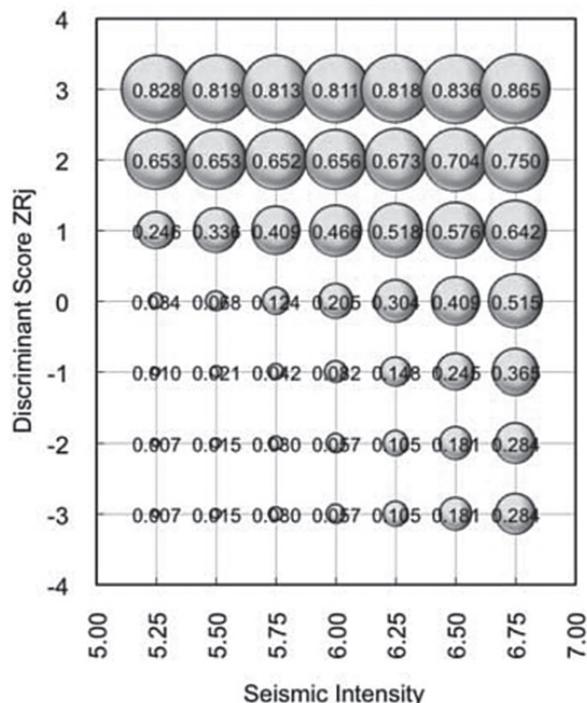


図5 地震動強さとSAR画像指標の統合処理による推定全壊率モデル⁸⁾

であるといわれている。この手法は、主に畳込み層と呼ばれるフィルタ処理層とプーリング層と呼ばれる情報を集約する層を交互に接続したモデルからなり、学習データに適合するモデルを誤差逆伝播法により推定する方法である。既存の機械学習では、解析者が画像から必要となる画像指標をあらかじめ抽出しておき、その指標に対して適合するモデルを探索していたのに対して、深層学習では必要とする指標さえも自ら探索することで、適合するモデルを構築する。これにより適切な学習データさえあれば、ほぼ自動的に最適な地物認識モデルを構築することができる。

最近では、2016年熊本地震での被災地を撮影した航空写真に対してCNNを適用して建物被害を推定する試みが行われている^{9,10)}。これらの検討では、建物被害程度について被害あり・なし、あるいは被害大・小のように分類することで、85%以上の高い精度で分類できることが示されている。一般的にリモートセンシング画像からの被害把握では、地震前後の画像を用いたのに対して、CNNでは地震後の画像のみからでも高い精度で解析可能であることが示されている。また、既存のテキスト解析では分類精度は75%程度であったのと比べると、CNNの方が高い分類精度が得られているようである。今後は、詳細な建物被害データを用いて被害程度をきめ細かく判別することができれば、大きな被害が集中する地域だけでなく、中程度

の被害の広がりも把握することが可能になり、より詳細な被害分布を把握できるものと期待される。

また、CNNを実装するにはPython等のプログラミング環境を整える必要があったが、例えば最近SONYが公開したソフトウェア¹¹⁾ではGUIによる直感的な操作により簡単にCNNを構築することが可能となっており(図6)、今後ますます深層学習による画像解析に関する研究が加速するものと考えられる。

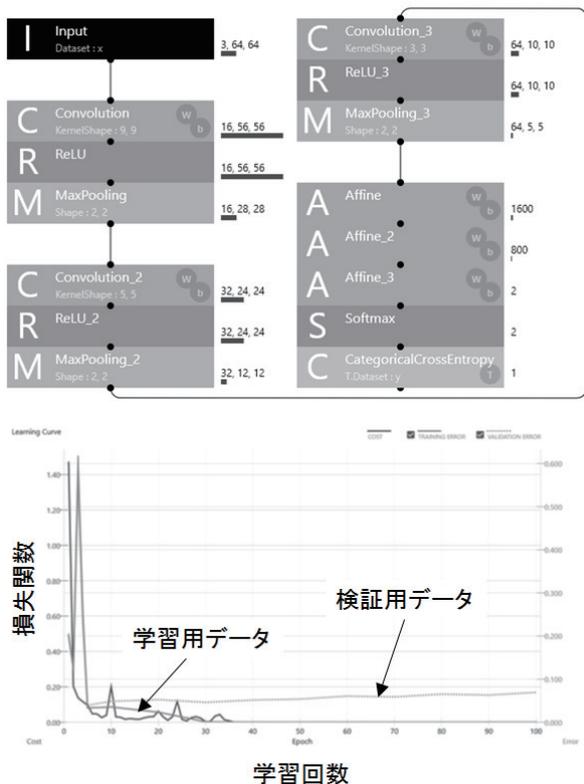


図6 Neural Network Console¹¹⁾におけるCNNの層構造の例と学習例

6. おわりに

本稿では、リモートセンシングによる建物被害把握に関する研究の一部を紹介した。特に、深層学習技術のように最新の人工知能技術を応用することで、既存の手法よりも高い精度で被害を把握できる可能性が示唆されている。これらの手法が目視判読に代わる技術として実用化できれば、格段に少ない労力・時間で被害分布の把握が可能になるものと期待される。

参考文献

- 1) 小川直樹, 山崎文雄: 航空写真を用いた兵庫県南部地震における建物被害の目視判読, 地域安全学会論文集, Vol.2, pp.119-128, 2000.
- 2) 松岡昌志・他: 1995年兵庫県南部地震での被害地域における人工衛星光学センサ画像の特徴, 土木学会論文集, No.668/I-54, pp.177-185, 2000.
- 3) Miura, H. et al.: Detection of Building Damage Areas of the 2006 Central Java, Indonesia Earthquake through Digital Analysis of Optical Satellite Images, Earthquake Spectra, Vol.29, No.2, pp.453-473, 2013.
- 4) 三浦弘之・他: 2010年ハイチ地震における被害地域検出のための高分解能衛星画像のテクスチャ解析, 日本地震工学会論文集, 第12巻, 第6号, pp.2-20, 2012.
- 5) 後藤智博, 三浦弘之: ヒストグラム平坦化とテクスチャ解析による光学センサ画像からの倒壊建物の検出 -2016年熊本地震における航空写真を用いた検討-, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造II, pp.419-420, 2017.
- 6) Matsuoka, M. and Yamazaki, F.: Use of Satellite SAR Intensity Imagery for Detecting Building Areas Damaged due to Earthquakes, Earthquake Spectra, Vol.20, No.3, pp.975-994, 2004.
- 7) Miura, H. et al.: Building Damage Assessment Using High-Resolution Satellite SAR Images of the 2010 Haiti Earthquake, Earthquake Spectra, Vol.32, No.1, pp.591-610, 2016.
- 8) 松岡昌志, 能島暢呂: 人工衛星LバンドSARに基づく建物の地震被害推定モデルの構築とALOS/PALSAR画像への適用, 日本地震工学会論文集, 第10巻, 第3号, pp.73-86, 2010.
- 9) 上岡洋平・他: 2016年熊本地震における斜め航空写真を用いた目視判読および深層学習による建物被害判別の検討, 地域安全学会梗概集, No.41, pp.127-130, 2017.
- 10) 釜ヶ谷悠馬・他: 熊本地震の空中写真を用いた深層学習による建物被害推定の検討, 日本地震工学会・大会, P4-30, 2017.
- 11) SONY: Neural Network Console Ver1.1.0, <https://dl.sony.com/>, (2017年12月閲覧)



三浦 弘之 (みうら ひろゆき)

1999年東京工業大学工学部卒業。同大学大学院総合理工学研究科人間環境システム専攻修了。東京工業大学21世紀COE研究員、同大学助教を経て、2012年現職、博士(工学)。専門分野: 地震工学、防災リモートセンシング

災害調査のための3次元モデルの活用

望月 貫一郎

●株式会社パスコ パスコ総合研究所 副所長

1. はじめに

空間情報の計測・取得及びデータ処理は、災害発生時の状況把握には欠かせない技術である。災害発生時には、迅速な状況の把握と災害復旧・救援活動、そして二次災害の防止などに資することを目的に、災害の種類、災害の規模、発生地域、被災地の天候状況に応じて、緊急撮影を実施している。その成果を、地方自治体や各省庁などの関係各機関や災害対策本部に提供して、二次災害の予防と迅速な復旧活動計画の策定に、利用して頂いている。

地震災害直後、できる限り早く建物の被災状況の全体像を広範囲に知る方法として、緊急撮影などで撮影した空中写真を用いた建物被害判読が実施されている。この建物被害判読では、一部損壊の建物では、家財の保護や雨漏り防止のために応急処置として、被災した建物にブルーシートが覆われている場合が多い。このブルーシート被覆建物の自動抽出手法は、建物の被災状況の全体像を広範囲に知る方法として、有用な手法であることが明らかとなっている¹⁾。

しかし、1階部分が圧潰（層破壊）の被害を受けている2階建て建物は、空中写真には屋根に損傷が無く全壊と判断できない状況で撮影されている。1階部分が圧潰している建物の被害を全壊被害として、正確に判読するためには、建物の高さ、あるいは、被災前の建物高さと被災後の建物高さの変化に着目することが必須となる。一般的に、この建物高さは、複数の空中写真のステレオ視によって求めることができ、デジタル化された空中写真を用いてデータ処理で求めることが実用化されている。

ここでは、災害発生後に、目的に応じた災害撮影を実施する撮影手法を紹介しながら、災害状況を撮影した複数の空中写真を用いて作成した3次元モデルを災害被害調査に活用した事例を紹介する。

2. 航空機からの災害撮影

航空機撮影によるデータの特徴は、人工衛星観測の画像データと比べると、低高度で観測することで地上分解能が高いことである。航空機撮影による航空機リモートセンシングの技術が実務に利用されている理由は、撮影時の姿勢変動が複雑である航空機の位置およ

び姿勢を、空中直接定位システム（GPS/IMU）の情報を用いて高精度で取得できること、計測した航空機および姿勢に基づき、撮影した画像データの位置補正を高精度で処理できることである。

2.1 携帯型斜め写真撮影システム

パスコ独自開発の携帯型斜め写真撮影システム PALS (Portable Aerialphotography and Locator System) は、被写体の位置を取得しながら斜め写真を撮影することができる撮影システムである。図1に、携帯型斜め写真撮影システムの概観を示す。このPALSは、GPSなど、複数のセンサを内蔵し、最小1.5秒間隔で写真撮影と各種センサ情報を同期させることで、斜め写真、自己位置、被写体位置を記録できる。PALSで使用するカメラは、1,600万画素で、撮影した斜め写真は自己位



図1 携帯型斜め写真撮影システム (PALS)



図2 PALSの撮影方法

置あるいは被写体位置を地図上に表示できる。ヘリコプター操縦士へ撮影コースを指示しながら、ヘリコプターに搭乗した撮影者がPALSのリングスタビライザを持って、臨機応変に被災状況を撮影する。

図2に、ヘリコプターの飛行ルートの一例を示す。この図では、飛行ルートが同心円状に旋回していることを示しており、被写体を中心に連続撮影していることを確認できる。

2.2 オブリークカメラ

図3に、オブリークカメラの概観及び撮影方法を示す。このカメラは、直下視方向と斜方視（前方視・後方視・右方視・左方視）の4方向、合計5台のカメラ構成である。直下視方向の垂直写真に加えて、斜め写真も同時に取得することができるため、斜め写真からは建物などの壁面情報を撮影することができ、正確かつ効率の良い建物被害の判読が可能となる。

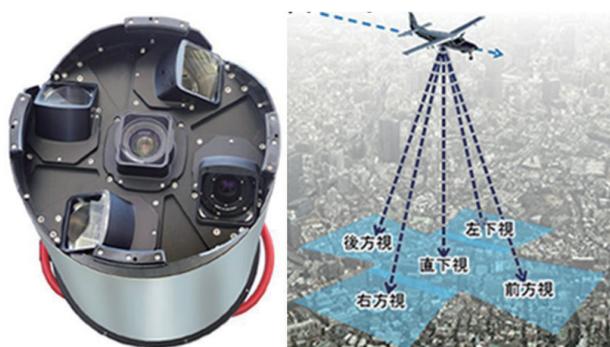


図3 オブリークカメラの概観及び撮影方法

3. 3次元モデルの作成

3次元モデルの作成に用いる動画像解析(SfM: Structure from Motion)技術は、ロボットビジョンや仮想現実生成など、3次元復元に使われ、視点を変えながら対象物を撮影して、視点の異なる複数の写真からその対象物の3次元形状と視点の位置を同時に復元する技術である。この技術を空中写真に適用して、現実空間を表現する3次元都市モデルを作成することができる。

通常の空中写真を用いる場合、直下視方向の写真を重ね合わせながら撮影を行い、重複した2枚の空中写真のステレオ視から、建物等の位置と高さ求める。

一方、3次元都市モデルを作成する場合は、建物などの壁面など、直下視方向の写真では撮影されない情報が必要となる。よって、多方向の視点、かつ、斜めから撮影された広範囲の写真を活用することが有効となる。

4. 災害被災調査

4.1 平成28年熊本地震の被災調査

4.1.1 PALSを用いた被災調査

熊本地震の被災調査の撮影は、撮影エリアは阿蘇市、西原村、益城町、熊本市を中心に、ヘリコプターからPALSを用いて、前震翌日の4月15日から撮影を開始して、述べ7日間実施した。撮影した写真枚数は、30,000枚を超えた。

図4に、熊本城を中心に、PALSで連続撮影した斜め写真を示す。複数の視点から熊本城の被災状況を確認できることがPALSの斜め写真の特徴である。この斜め写真は、斜め写真の中心の位置をデータとして所有しているため、地図上に斜め写真をプロットすることで、大量の斜め写真の中から必要な地点の斜め写真を容易に見つけることができる。

図5に、PALSで撮影した斜め写真を用いたSfM技術による熊本城の3次元モデルを示す。この3次元モデルをコンピュータ画面に表示することで、拡大・縮小しながら、任意の視点で熊本城の被災状況を確認することができる。つまり、熊本城の城壁の崩壊等、立ち入りが禁止されている区域の被災状況を詳細に確認することができる。

4.1.2 オブリークカメラを用いた被災調査

図6に、熊本県益城町周辺のオブリークカメラで撮影した直下視、斜方視（前方視・後方視・右方視・左方視）の合計5枚の写真を示す。図6の(a)に示す●印は、直下視写真を撮影した位置である。図6の(b)は、図6の(a)に示した5つの領域（フットプリント）の空中写真である。これらの空中写真は、●印の位置で撮影される。また、図7に、複数のオブリークカメラの空中写真を用い、3次元作成専用ソフトによる3次元モデルを示す。これらの3次元モデルから、全壊となった建物、屋根の瓦が崩れ落ちている様子、損傷の無いように見えるビニールハウス、さらに、樹木の高さなどが確認できる。

3次元モデルを作成するSfM技術では、同一地点を写す複数の写真は、さまざまな視点から撮影された写真を用いることが望ましい。このオブリークカメラの空中写真は、多方向から撮影した写真となるため、3次元モデルを作成するには有効な写真である。また、この3次元モデルは、人的被害が予想される建物崩壊の分析に極めて有効な情報である。

4.2 平成29年7月九州北部豪雨の被災調査

天候回復を待ち、雨の切れ間となった2017年7月7日の午後に被災地を撮影した。被災地上空は雲が多く、また、雲の動きが速い天候であった。この天候の合間

を縫いながら災害被害の撮影を実施した。

図8に、SfM技術による日田市小野地区の大崩壊地3次元モデルを示す。7月6日に初めて同崩壊地が報道され、その約24時間後にPALSで撮影を実施した。崩壊地直上の稜線を超えて雲が流れ込んできている気象条件のなかでの撮影だった。そのため、特に崩壊箇所源頭部は雲がかかる斜め写真が存在し、それらの斜め写真を活用して、この3次元データを作成することができた。

この図では、崩壊地の中腹で傾斜が変化し、上部よ

り下部の勾配が急であること、中腹に土砂や流木が多く堆積している状況を見て取ることができる。また、図の右手が上流側である。土砂ダムによる滞水がある状況において、家屋1軒分程度の幅の流路が存在しており、勢いよく流下している状況も確認できる。

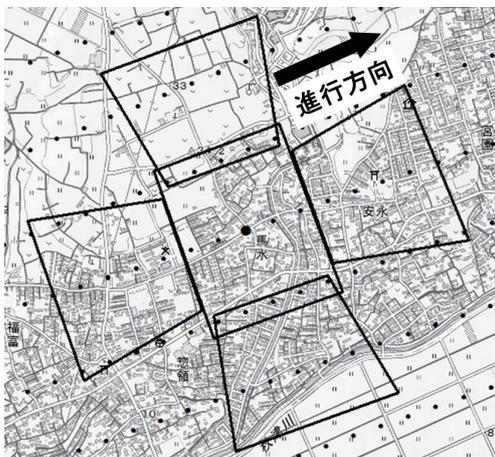
この崩壊地の3次元モデルを利用して、崩壊前の地盤の高さ（標高データ）と、災害後の3次元モデルの地盤の高さの差異を求めることで、崩壊によって移動した土砂量を求めることができる。



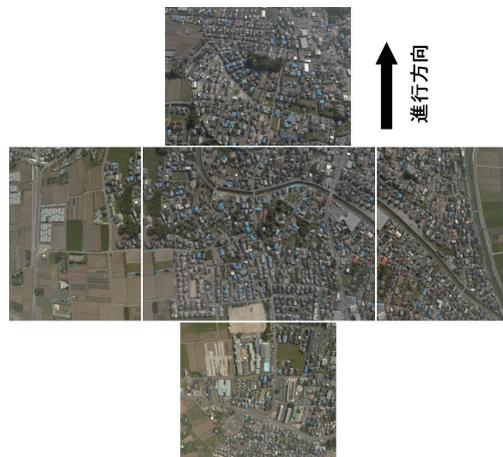
図4 PALSによる連続撮影した斜め写真（熊本城）



図5 PALSによる斜め写真を用いた3次元モデル（熊本城）



(a) オブリークカメラの撮影フットプリント



(b) オブリークカメラの空中写真

図6 オブリークカメラを用いた熊本県益城町周辺の空中写真



図7 オブリークカメラを用いた3次元モデル



図8 日田市小野地区の崩壊を示す3次元モデル

5. おわりに

地表面の状況を示す3次元モデルを災害被害調査に活用した事例を示した。特に、建物被害の状況を判読するためには、この3次元モデルが有効であることが明らかである。

また、国土地理院が提供している基盤地図情報には、建物形状のポリゴンを示す建物データがある。しかし、建物階数は属性データとして付加されていない。都市計画基礎調査の建物利用現況図データの建物階数の情報と被災状況を示す3次元モデルを併用して地震前後の建物高さの変化を求めて、建物被害の状況を正確に知ることが可能である。そのため、常時、これらのデータを準備しておくことが必要である。

参考文献

- 1) 本田禎人、望月貫一郎、下村博之、門馬直一：平成28年熊本地震での被災建物判読を目的としたブルーシート被覆建物の自動抽出、日本地震工学会2016年大会梗概集 発表番号:P2 27、日本地震工学会、2016。
- 2) 本田禎人、望月貫一郎、下村博之：建物高さ推定による層破壊建物の抽出、応用測量論文集、日本測量協会、pp.75-85、2017。



望月 貫一郎

(もちづき かんいちろう)

平成元年 (株)パスコ入社、博士(経営情報学)、空間情報総括監理技術者、法政大学デザイン工学部 兼任講師
 専門分野：リモートセンシング技術を利用した環境及び災害解析

地盤災害調査への適用

小長井 一男

●横浜国立大学 教授

1. はじめに

古事記や日本書紀に登場するヤマタノオロチ（八岐大蛇）は八つの谷と八つの峰を覆う八首八尾の大蛇である。「洪水の化身」と解釈されることもある。事実、蛇崩、蛇落など蛇のつく地名は、古来から洪水や土石流災害の常襲地に多い。それで思い出されるのは、2014年8月20日の広島豪雨災害である。豪雨の一週間後の長周新聞の論説に、「死亡者を多く出した八木地区は昔、八木蛇落地悪谷（やぎじゃらくちあしだに）と呼ばれ、先人たちが危険な地域として見なしていた」との記述があり¹⁾、過去から伝承された記憶を現代の開発が地名ごと消し去ってしまったことを痛烈に批判している。そもそも厄災の“厄”の字は切り立った崖を表す“厂”（がんだれ）の下に膝まづく人“卩”を示しており、また危険の“危”の字もさらに切り立った崖を表す“厂”（がんだれ）の上に膝まづく人“厶”を加えて崖上、崖下の危険をもって、災害の可能性を象徴する文字になったとされる。崖地が象徴的にリスクを表現するものとして、後世に経験を伝えようとする古人の思いが込められている。

専門家の間でさえ過去の災害の教訓の伝承は決して容易ではない。明治以降の多くの地震災害の報告書類のページをめくると撮影された写真の日時や場所すら記載されていないものが決して少なくない。地名が書かれたものもその多くは旧地名であって、旧版地図や地籍簿を当たらざるを得ない。それでも地籍未調査の場所もあり、当時の人々の間では鮮明であったであろう記憶も伝承されぬまま忘れられてしまうことも少なくないであろう。

一方で、地盤を構成する土は磁気テープのような履歴材料であり、過去の災禍を記録している記憶媒体とみることができる。したがって地形に残る地震痕跡を科学的に分析すれば、その土地で起こり得る災害のリスクを知り、地形が日常もたらす恩恵を最大限享受するための知恵を学ぶことができる。昨今のリモートセンシング技術は樹木に覆われる急傾斜地でも、それらを剥ぎ取ってその下に存在する地形の細部に至る特徴を検出することを可能にした。2016年の熊本地震を中心に、事例のいくつかを紹介し、私たちが教訓の伝承にどのように関わっていけるのか考えてみたい。

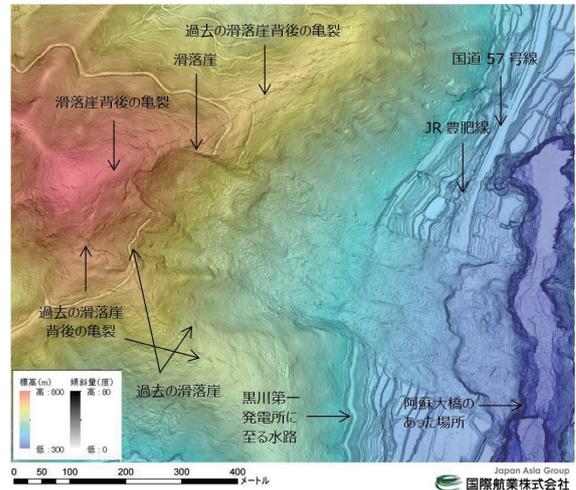


図1 阿蘇山カルデラ立野火口瀬（阿蘇大橋）付近のLiDAR計測結果（国際航業(株)計測¹⁾）

2. LiDARで暴かれる過去の災害痕跡

2016年熊本地震では日奈久断層北端から布田川断層にかけて右横ずれ成分を主体とする地震断層が現れ、この断層沿いに斜面崩壊や地盤沈下が帯状に発生した。特に悲惨だったのが阿蘇山カルデラから白川、黒川が合流して流れだす立野火口瀬と呼ばれるところにある阿蘇大橋周辺だった。阿蘇大橋は、80mほどの深さの黒川の谷に落とされ、男子大学生の捜索が進められていたが、残念ながら遺体となって見つかった場所である。この橋の背後の外輪山山腹から大量の土砂が崩落し、JR豊肥線、国道53号線などの主要交通路を遮断した。この地形をライダー（LiDAR）と呼ばれる航空レーザー計測で眺めてみたものが図1²⁾である。LiDARは（Light Detection And Ranging）の頭文字を並べたもので、航空機搭載のレーザーから地上に向かって波長が極めて短い（10μmから紫外光では250nmに及ぶ）パルスを照射し、その反射をとらえて、航空機から地上までの距離を計測する。毎秒数10万～100万回を超えるパルスを発射するので、少なからぬパルスは植生を通り抜け地表面に到達する。このため樹木や灌木を取り去った地形の詳細を観察できる。山腹をよく見ると、今回の地震による生々しい崩壊地の他にも、過去の崩壊地の痕跡を確認することができる。さらにこれらの崩壊地痕跡の背後に沿って、今回の地震で生じた新たな亀裂も確認でき、これらは将来のリスクも暗示する。地形が磁気

テープのように過去、現在、そして未来の斜面災害リスクを記録していて、主要交通路線の通過するこの場所で類似の災害のリスクが大きいことを物語っている。国土交通省はこの将来のリスクを重く見て、20億円ほどの予算を投じ、今回の崩壊地滑落崖背面の3万m²の広さの不安定な土砂を除去する工事を始めている³⁾。

3. 埋もれる地震痕跡

植生をはぎ取って地盤に残る災害痕跡をあぶりだすLiDARの防災への活用は今後一層その重要性を増すであろう。しかし熊本地震で厄介なことは、阿蘇が活火山であり、かつて地表に残された痕跡を火山砕屑物などが覆い尽くしていたことである。阿蘇カルデラ北西部に断続的に現れた総延長10kmにも及ぶ陥没帯は、地表の下に過去の類似の変形がおそらくは覆い隠されていたであろう“想定外”の地形変動だった⁴⁾。折しも田植え前で、農業施設や一般家屋に深刻な被害が生じた。

図2のビニールハウスの写真の手前に見える亀裂は深さ1mにも及び、露出した断面には、上から表土、黒ぼく土、軽石を含む火山灰の成層構造が確認できる。黒ぼく土の名は、黒っぽい土の色と乾燥した土を触った時のボクボクした感触に由来し、古来から農民による呼び名であったと言われている。英語ではAndosolと言われるが、この“Ando”は日本語の“暗土”に由来し、やはり色の黒い土であることを意味している。併せて、この土の名が日本由来であることは、海外ではあまり見られない土であることも暗示している。母材である火山灰土に腐植した植物が混じったものである。たびたび降下する火山灰に加えて、その後繁茂する植生が、昔の地震痕跡を急速に覆い隠していった経過を象徴するかのようである。この断続的に現れた、総延長10kmほどの陥没帯の複数個所で、ドローン撮影の複数画像から写真測量法 (photogrammetry) による地形情報の抽出が行われている。

アメリカの地盤災害調査団 (Geotechnical Extreme



図2 陥没帯に落ち込んだビニールハウス (撮影: 小長井一男、撮影場所: 北緯35.9565°, 東経131.0366°)

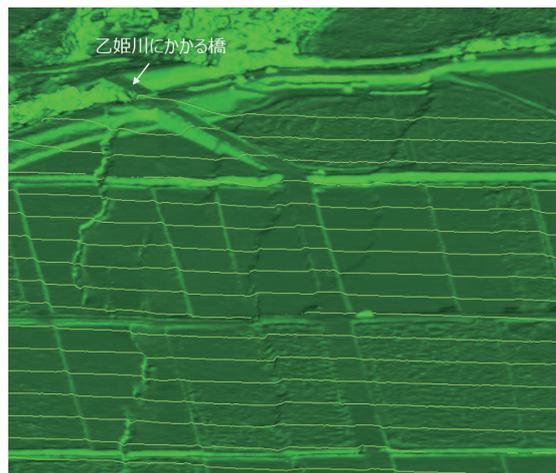


図3 尾ヶ石東部小学校近くの橋梁付近 (N 32.952781°, E 131.02371°) に現れた陥没帯の3次元標高モデル (GEERの計測による)⁵⁾

Events Reconnaissance, GEER)のケビン・フランケ (Kevin Franke) もドローンを飛ばし、尾ヶ石東部小学校近くの橋梁付近に現れた陥没帯の3次元標高モデルを作成している (図3)⁵⁾。地表面に等間隔に引かれた白線の起伏が陥没帯の存在を示している。この図で、乙姫川という小河川に架かる橋が写っているが、この橋は沈下していない。橋梁の基礎には杭が打ち込まれていると推定されるので、陥没が深い地盤ごと下がったのであれば杭も一緒に引きずられて下がる。ところが、その様子はなく陥没を引き起こした原因は意外に浅い部分にあるのかもしれない。

2017年2月に辻らがNature誌に地震後に湯が出なくなった内牧温泉 (図3の陥没帯北端近くにある温泉) の井戸のうち5地点にカメラを入れて調べ、いずれもがほぼ50mの深さで屈曲していることを報告している⁶⁾。そして辻らは、地下50mより浅い部分の地塊が北西に約1.5mほど移動したため、引っ張りひずみの大きくなる地塊の南東縁に沿って陥没帯が現れた可能性があるとしている。50mほどの厚さの地塊を、ほぼ水平に北西方向に移動させた原因については、辻らは液状化や断層直角方向の強い揺れの可能性を示唆しているが、原因が特定されたわけではない。今後更なる調査が必要であろう。

アメリカの調査団がドローンを飛ばした場所 (図3) のわずか200 m程北西隣に弥生時代の小野原 (おのぼる) 遺跡がある。熊本県文化財調査報告第257集⁷⁾によれば、黒川広域基幹河川改修事業に伴い1999年から2004年にかけて行われた遺跡の発掘で、この地震で現れた陥没帯とそっくりな地変 (図4)⁷⁾が見つかっている。この地変が、埋もれた弥生時代の地震痕跡であるのなら、同じ場所で過去に同様の陥没帯が発生してい

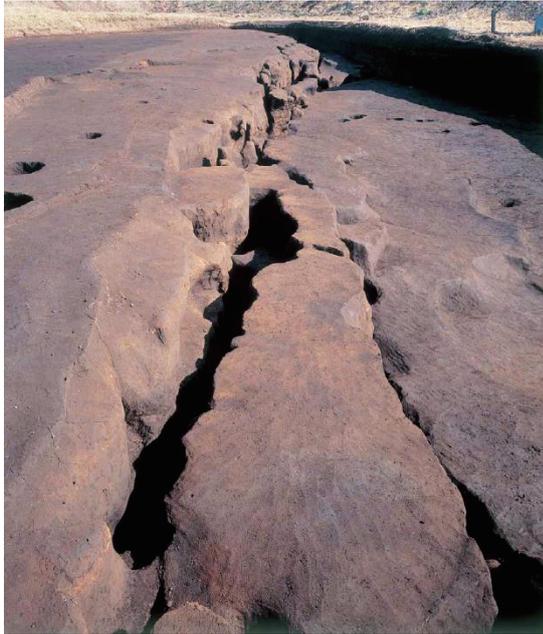


図4 小野原遺跡で発掘された陥没帯⁷⁾
(熊本県教育委員会)

た可能性を示唆するものであろう。またその年代の特定が、熊本地震と同規模の地震の再現周期を考える上で役に立つであろう。過去の地震痕跡は、防災上の有用な多くの情報とヒントを与えてくれるのである。

4. 地盤沈下と豪雨

断層沿いに現れた明瞭な地変に比べると、この地震で甚大な被害を受けた益城町の南、秋津川、木山川の

氾濫原平野に、明瞭な地形変形の痕跡は一見して見当たらない。しかし航空レーザー (LiDAR) 測量による地震前後のデジタル標高モデルを比較すると、木山川沿いの平地で1mを超える沈下が現れたことがわかる (図5の青色の部分)⁴⁾。この地域は、地震からおおよそ2か月経った6月20日から21日未明にかけての豪雨で浸水した (図6, 朝日新聞提供)⁸⁾。増水した木山川の水が左岸堤防を越流したのだ。この地盤の沈下は、地殻変動の影響を反映したものかもしれない。また木山川に矢形川が合流するあたりでは液状化した砂が道路を被覆した報告もあって、一部には液状化の沈下の影響もあるかもしれない。いずれにしても広域の地盤の沈下は洪水への脆弱性を増す結果につながった。

この沈下の原因の一つを示唆するかもしれない不思議な光景が、沈下域の南西端で見られた。熊本市上下水道局沼山津および秋田配水場近くで、複数の上水井戸ポンプの建屋が傾いたのだ (図6, 右上写真)⁴⁾。そこでトータルステーションを用いて、秋田配水場周辺の5つの井戸ポンプ建屋の傾斜角とその方位角を計測した (図5, 左下破線枠内、及び図7)⁴⁾。計測された傾斜角はおおよそ1°~2°の範囲である一方、方位角はまちまちで、一見規則性が見られない。しかしよく見ると、建屋は例外なく鋼製井戸ケーシングから、最も遠い建屋支柱側に向かって傾いている (図8)。それぞれの井戸は深さ200 m程に達していて、多孔質の溶岩層、あるいは軽石混じりの砂礫層から取水されている。この深く根入れされた井戸の鋼製ケーシングの上端は、4本

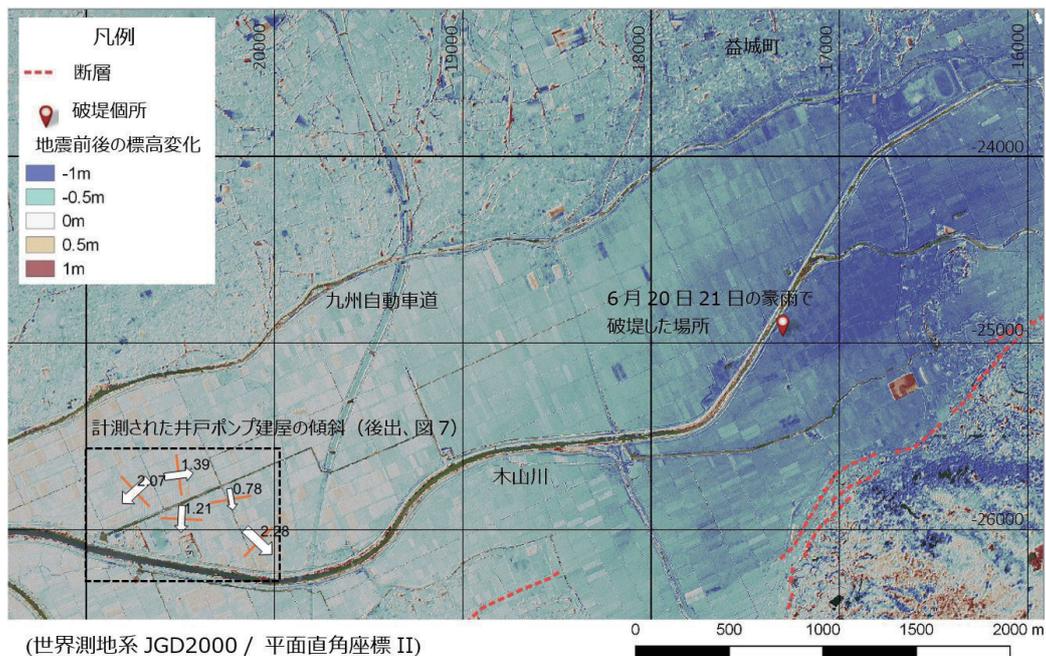


図5 木山川沿い氾濫原の沈下状況⁴⁾
(地震前後の地形標高モデルは国土地理院より提供)



図6 傾斜した秋田第二井建屋と、6月20日、21日の豪雨による木山川破堤と浸水状況
(写真は朝日新聞デジタルより⁸⁾。掲載許可証 No. R/079519)⁴⁾



図7 秋田配水場付近の井戸ポンプ建屋の傾斜角と方向⁴⁾
(衛星写真はGoogle Earthより)

の柱に支えられた建屋床の中央ではなく、4隅の一つに大きく偏った状態で固定されている。一方で、ポンプ建屋の4隅の柱の基礎のそれぞれは、長さ約20 mのPCコンクリート杭で支えられていて、この杭は地表近くの有機質粘土層を貫き、軽石混じりの砂層に達して

いる。もし井戸の鉄製ケーシングが“突っ張り棒”として働く一方で、これらのコンクリート杭が有機質粘土層とともに沈下したのであれば、井戸建屋の全ての傾きの方向が説明できる。沈下する地盤がそれぞれのコンクリート杭を引き下ろそうとする力は、わずか6

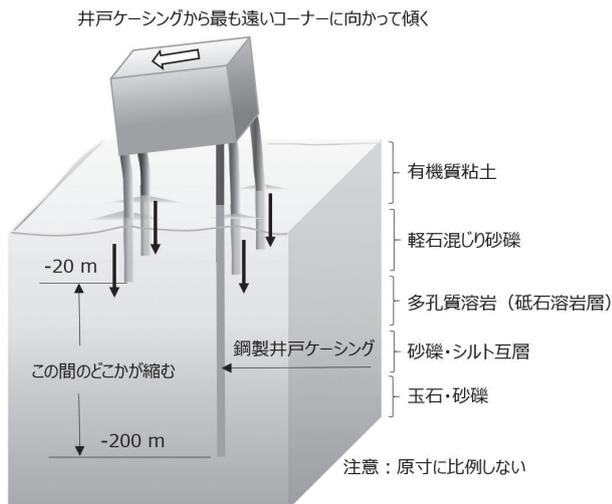


図8 井戸建屋の傾斜から推定される地盤変形

m×8mのポンプ建屋の奥行と幅の中で大差ないと考えられ、鋼製ケーシングから最も遠方にある杭が、テコの原理で井戸建屋をこの特定の方向に最も傾けようとしたと考えられる。

この現象は深さ20mのコンクリート杭の先端と、200mにも達する井戸の鋼製ケーシングの最下端の間のどこかが縮まないと説明できない。地殻変動であれば鋼製ケーシングも含めて深いところから地盤全体が下がるので、このような井戸ポンプ建屋の傾きは起こらない。一般に日本の沖積平野の地盤は、実質的に体積の変化しない水で飽和していることが多いので、どこかの体積の減少は、どこか他の場所への体積移動となって現れなければならない。液状化の場合には、噴砂の形で水混じりの砂が地表に噴き出してくるので、これに伴う沈下は起こり得るが、噴砂の痕跡はこのあたりの地表で見られない。どこか深い場所で、気泡を多く含む軽石が粉碎された可能性が考えられる。地形変動は地下深くからの変形が累積された形で観測されるものである。まだ謎は残されたままである。

5. まとめ

地形に残された地震痕跡を探る時、直接見ることができて計測が容易な地表の情報に多くを頼らざるを得ない。そしてLiDARやInSARなどのリモートセンシング技術は、地震が引き起こした地形変形を空間的に高分解能でまた高精度で検出することを可能にした。しかしリモートセンシング技術だけでなく、地下の変形の情報をも多面的な調査の中で抽出していくことが併せて原因解明に必要である。火山灰や軽石などで地下に埋もれた痕跡を探る場合には、地下に埋設された温泉の井戸、上水用の深井戸の変形などが役に立つ。な

ぜなら、これらの埋設物は周辺地盤の動きに従って容易に変形するため地下の変形痕跡をとどめているからである。それ以上にこうした情報は、地下に埋設されるトンネルやパイプラインの設計に重要である。地上のみならず地下も含めて地盤に残る地震痕跡を集約していく努力が、将来の防災戦略に必要である。

参考文献

- 1) 広島土砂災害が示す重大な教訓 救える命が救えぬ鈍い対応, 長周新聞, 2014年8月27日, <https://www.chosyu-journal.jp/shakai/850> (2017年12月26日閲覧).
- 2) 【速報】平成28年(2016年)熊本地震, 国際航業株式会社, 2016年4月. http://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/201604_kumamoto/ (2017年12月26日閲覧).
- 3) 国土交通省九州地方整備局でのブリーフィング, 2016年7月.
- 4) Kazuo KONAGAI, Masataka SHIGA, Takashi KIYOTA and Takaaki IKEDA: Ground deformation built up along seismic fault activated in the 2016 Kumamoto Earthquake, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol. 73, No. 4, I_208-I_215, 2017, https://doi.org/10.2208/jscejsee.73.I_208.
- 5) Geotechnical Aspects of the 2016 MW 6.2, MW 6.0, and MW 7.0 Kumamoto Earthquakes – Ver. 1.0 –, GEER-048, doi:10.18118/G6JS3M, July 13, 2016. http://www.geerassociation.org/component/geer_reports/?view=geerreports&id=75&layout=default
- 6) T. Tsuji, J. Ishibashi, K. Ishitsuka, R. kamata: Horizontal sliding of kilometre-scale hot spring area during the 2016 Kumamoto earthquake, Scientific Reports 7, 42947, Nature, 2017. <http://www.nature.com/articles/srep42947>
- 7) 小野原遺跡群 一黒川広域基幹河川改修事業に伴う埋蔵文化財調査報告書一, 熊本県教育庁教育総務局文化課, 2010, <http://sitereports.nabunken.go.jp/ja/15624>
- 8) 熊本豪雨、男女6人死亡 益城町や宇土市の広範囲で冠水, 朝日新聞デジタル, 2016年6月21日21時34分, <http://www.asahi.com/articles/ASJ6P4VM7J6PTIPE01X.html> (公開期間終了)



小長井 一男 (こながい かずお)

1979年東京大学工学系研究科土木工学専門課程博士課程中退、長岡技術科学大学助手、同助教授、東京大学生産技術研究所助教授、同教授を経て現在、横浜国立大学教授、工学博士、専門分野：地震による地盤災害と国土保全

リモートセンシングによる液状化被害の広域把握

松岡 昌志

●東京工業大学 環境・社会理工学院 准教授

1. はじめに

地盤の液状化は、建物や橋梁、ライフライン施設に甚大な被害を与えることから、地震発生後に液状化被害を把握することは重要な課題のひとつである。液状化発生予測は、ボーリング資料、N値、細粒分含有率、地下水位データ等の地盤調査データから液状化指数(PL値)¹⁾によって判定することが多い。しかし、この方法は地盤調査データのある地点に限られる。また、広域での液状化予測に関しては微地形区分による予測手法²⁾が提案され、地震後に得られる強震観測記録に基づき、強い揺れに見舞われた地域における液状化発生の可能性を即座に推定・公開するシステム³⁾が運用されているが、概略把握をするにとどまっている。そのため、液状化発生を特定するためには現地調査が必要になるが、被害が広域にわたる場合には被害の全容把握に多大な時間を要する。

現地に行くことなく地域の情報を取得する手段として、人工衛星や航空機等によるリモートセンシングがある。一度に広い地域を観測できることから、地震直後に得られた観測画像から液状化発生地域を特定できれば、被害全体像の把握や現地調査の効率化に資する。本稿では、リモートセンシング画像からの液状化被害の把握について、最近の研究事例を紹介する。

2. 光学センサ画像からの液状化地域の把握

地面や土地被覆の分光反射特性に基づき、液状化の発生のしやすい地域を人工衛星の光学センサ画像から推定するといった危険度推定の観点から論じた研究は幾つかある⁴⁾⁶⁾。しかし、地震発生後の比較的早い時期に観測された画像に基づいて、液状化被害の把握を試みた例は比較的少ない。例えば、被災地を観測した航空写真から液状化に伴う噴砂状況が判読できる場合がある。そのため、地上分解能が高いセンサであれば、噴砂地点の分光反射特性を利用して、噴砂状況を検出できる可能性がある。越智ら⁷⁾は2011年東北地方太平洋沖地震の前後に千葉県我孫子市を観測したWorldView-2画像を用いて、クラスタ分類、決定木による分類、最尤法による分類を組み合わせた手法を適用して噴砂地域の検出を試みている。噴砂はあるまとまりをもって出現することから、画像のピクセル単位の

分光反射特性だけでなく、ピクセルのまとまり(セグメント)を考慮することが検出精度の向上に寄与することを示している。

また、噴砂地域特有の色とテクスチャを直接的に利用して、ピクセル単位ではなくパッチ単位(任意の範囲に切り出した画像)で噴砂地域を自動検出する研究が行われている。篠原ら⁸⁾は、2016年熊本地震の噴砂の有無を真値として、液状化地域を観測した航空写真を入力として、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いて噴砂地域の特徴を学習させている。CNNとはディープラーニングのひとつのアルゴリズムであり、画像認識分野でよく用いられている人工知能技術である。住宅地と農耕地の噴砂地域を学習させて分類器を作成し、その精度を検証したところ、農耕地では過剰検出の傾向があるものの、検出精度が高い結果が得られている。図1には農耕地における検出結果を示す。図1の矩形の枠(パッチ)がCNNによる噴砂検出であり、ピンで示す実際の噴砂地点とその周辺に分布することがわかる。一般にディープラーニングの学習には数万から数十万の膨大なデータが必要といわれている。分類器の汎用性については課題が残されている。他の地震の液状化データを追加することで、分類器の汎用性を向上させることが期待される。



図1 噴砂地域の抽出(矩形のパッチがCNNによる自動抽出, ピンが噴砂地点)⁸⁾

3. 合成開口レーダ(SAR)画像における液状化地域の特徴

太陽光による反射を記録する光学センサ画像とは異なり、合成開口レーダ(SAR)画像は人工衛星や航空機等のプラットフォームから照射されたマイクロ波の反射(後方散乱)を記録する。そのため、対象物の凹凸や誘電率に起因した後方散乱強度のみならず、プ

プラットフォームと対象物との距離による違いを後方散乱位相として記録する。液状化による噴砂の規模が大きく、かつ、湿った状況であれば、誘電率が高いために理論的には後方散乱強度が大きくなる。したがって、地震後の噴砂地域のSARの強度画像は地震前の画像よりも明るく写る可能性が高い。しかし、地震直後の湿った噴砂を観測した事例がほとんどないために実証が十分ではない。

一方、地震前後の後方散乱位相の干渉解析 (InSAR) で得られる地盤沈下量から液状化地域を類推する研究がある。InSARは1992年のランダース地震以降、地震や火山に起因した地殻変動の把握に利用されてきた手法である。InSARの結果には大局的な地殻変動だけでなく、液状化に伴う局所的な地盤変動も含まれている。石塚ら⁹⁾は2011年東北地方太平洋沖地震を観測したALOS PALSAR画像のInSARにより千葉県沿岸域で発生した液状化地域の地盤沈下量を推定している。また、Liu et al.¹⁰⁾は、2011年2月のクライストチャーチ

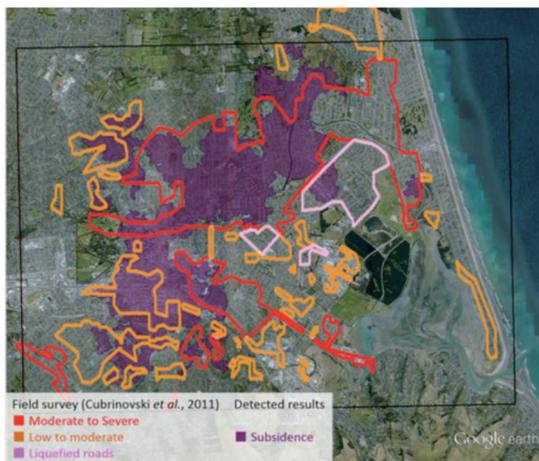


図2 InSARから推定した地盤沈下の範囲と液状化地域の対応¹⁰⁾

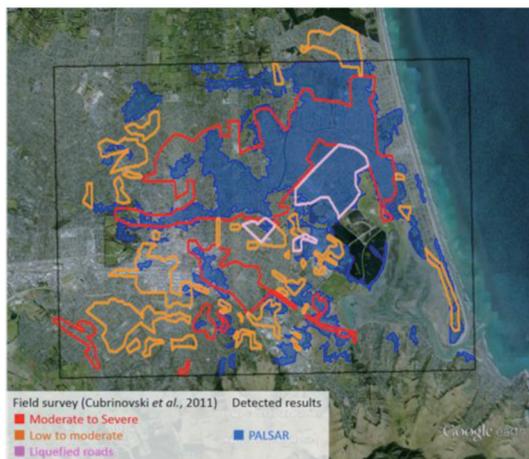


図3 コヒーレンス低下域と液状化地域の対応¹⁰⁾

地震の被災地を観測したALOS PALSARとTerraSAR-X画像のそれぞれについてInSARを適用している。そして、両者の結果から地盤の上下変動量を推定し、地盤沈下は液状化が発生した範囲と対応がよいことを示している (図2)。なお、この研究では地震前後の位相差分の空間的なバラツキ (干渉性) を表す指標 (コヒーレンス) が液状化地域で低下することも示している (図3)。先に述べたように、位相はプラットフォームと対象物との間においてマイクロ波が伝播した距離に依存する。したがって、建物被害のように地表に変化があった場合でも、地震前と地震後では伝播距離が異なるのでコヒーレンスが低下する。つまり、コヒーレンスには地盤と建物の両方の変化が含まれている。

2016年熊本地震を観測したALOS-2 PALSAR-2画像でも同様の傾向がみられる。地震前後のコヒーレンス画像をみると益城町などにおいて甚大被害を受けた建物群だけでなく、噴砂が確認された地点との対応がよい。図4(a)には熊本市南区近見～川尻地区付近のコヒーレンス画像を、図4(b)には液状化の帯をまたぐ4測線のコヒーレンスの値の断面を示す。この地域では旧鹿兒島街道に沿って約7kmに渡って帯状に液状化が発生していることが確認されている。なお、益城町などに比べると倒壊などの建物被害はほとんどない。また、地震後2ヶ月経過した観測画像を用いた解析でもコヒーレンス低下の帯がみられることから、地表面の噴砂がコヒーレンスに影響しているとは考えられない。そこで、賀川ほか¹¹⁾では液状化による地盤沈下がコヒーレンス低下の要因であるとの仮説に基づき、人工衛星の位置や観測条件をほぼ同一にしたシミュレーションを行っている。地盤モデルとして地震前の地面を平面と考えてこれをMasterとし、地震後の沈下した地盤をSlaveとして幅約100mの範囲において最大0.05m, 0.1m, 0.2m, 0.3m, 0.5m沈下したと仮定している。図5に地盤モデル、図6にシミュレーション結果を示す。地盤沈下によってコヒーレンスが低下し、沈下勾配および沈下量が大きくなるとコヒーレンスの低下も大きくなり、図4(b)との対応もよい。液状化に伴う地盤沈下地域をコヒーレンス画像から検出できる可能性があることがわかる。

4. おわりに

本稿では、リモートセンシングによる液状化被害把握に関する研究の一部を紹介した。液状化の噴砂を直接的に観測して抽出するという目的においては、ドローンや航空写真等の高分解能画像が有効であり、目視判読に代わる手法としてディープラーニングのような人工知能技術の活用が期待される。また、液状化に

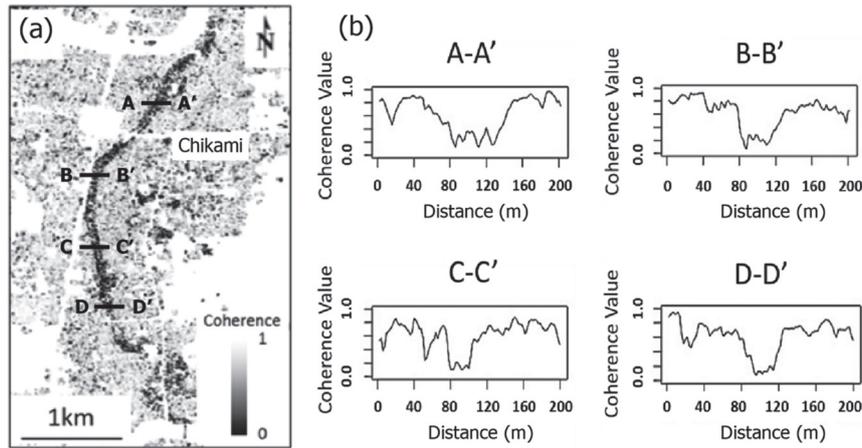


図4 ALOS-2 PALSAR-2のコヒーレンス値, (a) 熊本市南区近見から川尻地区の画像, (b) 4測線におけるコヒーレンス値の断面

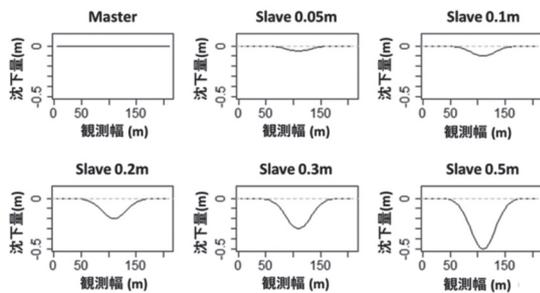


図5 地盤モデル (Masterは地震前のモデル, Slaveは沈下量が4パターンの地震後のモデル)

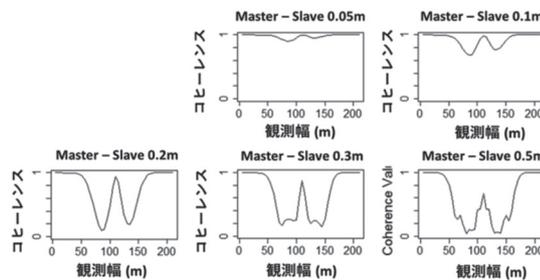


図6 シミュレーションによるコヒーレンスの値

伴い地盤沈下が発生した地域では地震前後のSAR画像の位相の干渉性(コヒーレンス)が低下し、干渉解析(InSAR)から沈下量が推定可能である。このように、地盤沈下現象から間接的に液状化の可能性を示唆する方法もある。

参考文献

- 1) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田進: 地震時地盤液状化の程度の予測について, 土と基礎, Vol.28-4, No.1164, pp.23-29, 1980.
- 2) Matsuoka, M., Wakamatsu, K., Hashimoto, M., Senna, S., Midorikawa, S.: Evaluation of Liquefaction Potential for Large Areas Based on Geomorphologic Classification, Earthquake Spectra, Vol.31, No.4, pp.2375-2395, 2015.
- 3) 松岡昌志, 山本直孝, 若松加寿江: 微地形区分に

- 基づく簡便な液状化評価手法を用いた液状化危険度マップ(LiquickMap)即時推定システムの構築, 地域安全学会梗概集, No.32, pp.19-20, 2013.
- 4) 後藤憲之輔, 坂元誠, 沢野佳稔, 陶野郁雄: 液状化地盤のランドサットデータ特性, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp.831-832, 1986.
 - 5) 栗田哲, 岸田英明, 北山浩平: 液状化した地域におけるランドサットTMデータのバンド特性, 第25回土質工学研究発表会講演集, pp.119-120, 1990.
 - 6) 戸松征夫, 佐藤靖彦: リモートセンシングデータを利用した液状化危険度解析の事例的研究, 第9回日本地震工学シンポジウム, Vol.1, pp.127-132, 1994
 - 7) 越智士郎, 古関潤一, 宮下千花, 沢田治雄: 高分解能衛星画像を利用した液状化噴砂地の抽出, 生産研究, Vol.64, No.4, pp.25-28, 2012.
 - 8) 篠原崇之, 佐藤俊明, 武田大典, 下村博之, 先名重樹: 平成28年熊本地震における液状化被害抽出手法の検討, 日本地震工学会・大会—2017梗概集, P4-30, 10p, 2017.
 - 9) 石塚 師也, 辻 健, 松岡 俊文, 水野 敏実: 干渉SAR解析を用いた2011年東北地方太平洋沖地震で発生した東京湾臨海域の液状化に伴う広域地表変動量の推定, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.68, No.1, pp. 175-182, 2012.
 - 10) Liu, W., Matsuoka, M., Yamazaki, F., Nonaka, T. and Sasagawa, T.: Detection of Surface Displacements and Liquefied Areas in the 2011 Christchurch Earthquake from SAR Data, Proc. of the 34th Asian Conference on Remote Sensing, pp.SC05-266-273, 2013.
 - 11) 賀川健人, 松岡昌志, 大串文誉: 2016年熊本地震で発生した液状化地域におけるSAR画像のコヒーレンス低下シミュレーション, 地域安全学会梗概集, No.39, pp.89-90, 2016.



松岡 昌志 (まつおか まさし)

1990年室蘭工業大学工学部卒業、1992年東京工業大学大学院総合理工学研究科社会開発工学専攻修了、同大学助手、リモートセンシング技術センター、理化学研究所、防災科学技術研究所、産業技術総合研究所を経て、2012年より現職、博士(工学)。専門分野：地震工学、サイスミックゾーニング、リモートセンシング

リモートセンシング技術の進展によって 変わりつつある活断層像

遠田 晋次

●東北大学災害科学国際研究所

1. はじめに

活断層を理解し内陸地震の長期評価につなげるためには、地表地震断層（以下、地震断層）の詳細と震源との関係を理解することが重要である。日本列島内陸では、 $M \geq 6.8$ で地震断層の出現率が急増し、 $M \geq 7.3$ で100%地震断層が出現することが指摘されている¹⁾。地表の活断層は断層変位の繰り返しによって形成されるものであるから、地形・地質調査によって活断層を抽出することで、 $M6.8-7.3$ 以上の震源を予測することができる。これが長期予測の基本的な考え方である。その際に、固有地震モデル²⁾に代表されるように、1つの活断層（帯）から1つの内陸地震が割り当てられてきた。

しかし、活断層と震源を一对一で対応させるこのような単純な図式は、リモートセンシング（以下、リモセン）技術の進展により覆されつつある。1つの内陸大地震で広域にわたり多数の断層変位が検出され、 $M6$ 前後の地震でも地震断層が出現するなど、活断層とは何かをあらためて見直す時期が来ている。以下では、最近の代表的な事例を紹介しつつ、活断層像再考の要点を指摘したい。

2. リモセンによる詳細な地表地震断層分布と地殻変動

地震断層の把握に劇的に容易にしたのが、干渉SAR技術である。地震にともなう地殻変動検出に初めて干渉SARが導入されたのは、1992年Landers地震である³⁾。Landers地震はカリフォルニアのモハベ砂漠で起きた $M7.3$ の横ずれ断層型の地震で、全長80 kmの地震断層が植生のない地表に露出した。注目されたのは、100 km四方にもおよぶ地殻変動を干渉縞の分布として面的に捉えたことである。さらに、活断層研究にとって衝撃的だったことは、干渉縞の不連続部分が地震断層に見事に一致していたことだ。もはや地表を蟻のようにくまなく歩かなくても、衛星から地震断層の分布が把握できることを意味する。

その後、衛星運用方法やマイクロ波の照射仕様の改善が図られ、大地震発生後の迅速なデータ取得と精細な干渉画像の取得が可能になった。今では、地震発生後2~3日程度で地震後のデータ取得と解析結果が公表される。干渉縞不連続部を現地地震断層として確認するという流れが確立されつつある。

一方、地表面の詳細な三次元座標を計測する航空レーザー計測（Airborne LiDAR）も地震断層の詳細把握に使われる。地震後の調査だけではなく、都市部や山間部での活断層の発見にも利用されてきた⁴⁾。サンアンドレアス断層では断層を横切る河川の定量的な横ずれ復元作業によって、過去複数回の地震時変位量が解明されている⁵⁾。

米国では地震発生前に航空レーザー計測を行っており、地震後のDEMとの差分を取ることで地殻変動や断層変位を算出する研究プロジェクトが進められている⁶⁾。このような手法を差分LiDAR（differential LiDAR）解析といい、干渉SARよりも、断層沿いで高精細かつ3次元的な変位ベクトルを得ることができる⁷⁾。日本列島も砂防など各種目的で詳細DEMが得られている地域も多くなり、地震による解析結果も示されている。

3. 1つの地震から生じる複雑な地表地震断層

リモセンによる高精細地表変動マップが得られるようになって約20年が経過した。これにより、1980年代以前であれば見落とされていたであろう地震断層の詳細分布が次々に示されている。その結果、主断層や明確な分岐断層以外にも、広範にわたる副次的な断層（副断層）や主断層から数十km以上遠地での微小な誘発変位など、地震発生時に生じる複雑な地表変位が把握されるようになった（図1）。以下、最近の事例を簡単に紹介する。

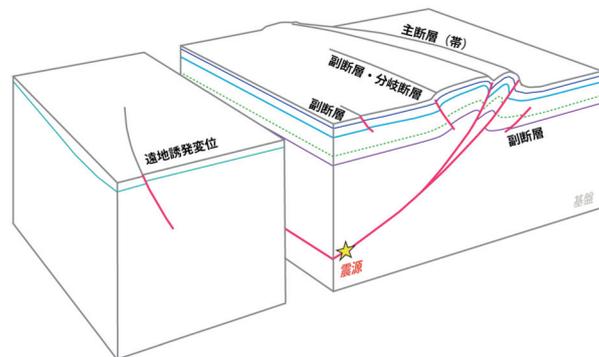


図1 主断層、分岐断層、副断層、誘発変位のイメージ

2008年6月17日岩手・宮城内陸地震（ $M7.2$ ）では、余震域東縁に沿って北東走向に約20kmにわたって地震断層が現れた⁸⁾。この地震では、地震後の高密度航空

レーザー計測によって、一般走向と異なる北西走向の新鮮な地震断層が複数確認された(図2)。地震断層本体は、北東走向の西傾斜の逆断層であるが、一部で複雑な構造を呈していることが分かった。

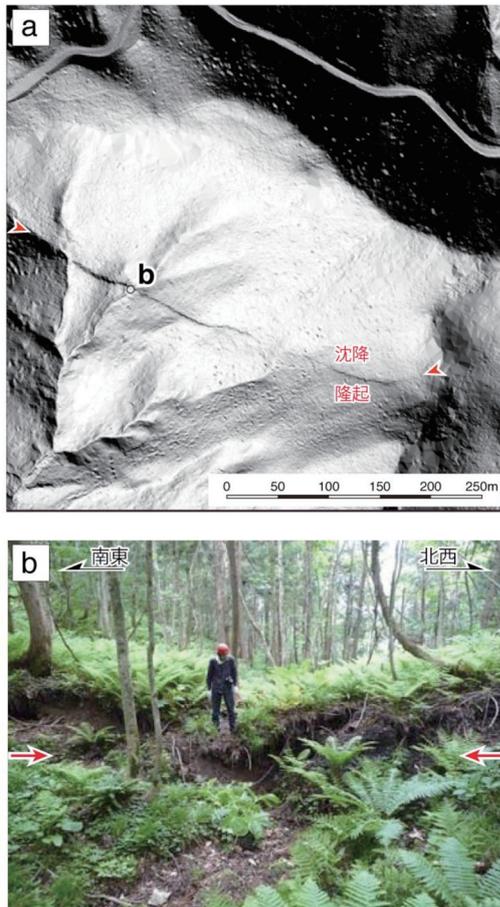


図2 2008年岩手・宮城内陸地震の地震断層帯北端、国見山南麓の地震断層⁹⁾(a)地震断層を示す0.5mDEM陰影図。地震断層は斜面低下側が隆起する逆向き低崖として現れた。(b)確認された地震断層崖

2011年4月11日福島県浜通りの地震では、湯ノ岳断層と井戸沢断層の一部に沿って、それぞれ長さ約15kmの正断層型の地震断層が出現した(最大変位はそれぞれ約90cmと約210cm)。干渉SAR画像からは、この2つの主断層以外にも、最大10cm程度の多数の断層変位が検出され、主断層から約10km遠方にも数cm程度の断層変位が見いだされた(図3)。

2016年4月16日熊本地震(M7.3)では、日奈久断層帯北部と布田川断層帯沿いに地震断層が出現した¹⁰⁾。両断層帯の合流部では分岐・並走・雁行など、複雑な分布が干渉SAR画像から浮かび上がり、現地調査で確認された。また、西原村では布田川断層の約1~2km南に並走するように、北落ち最大2mの正断層が10kmにわたって出現した¹¹⁾。震源断層での斜めすべりの運動

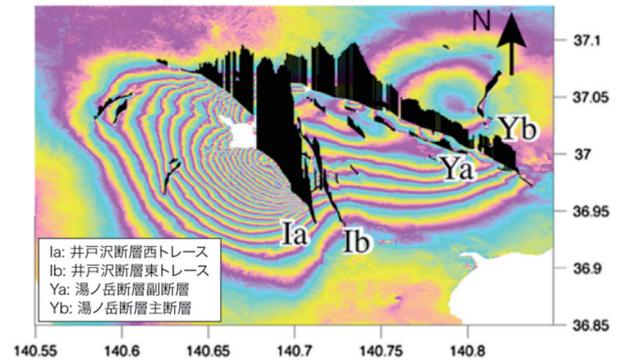


図3 2011年福島県浜通りの地震による干渉SAR画像と干渉縞不連続から推定される地震断層と変位量分布¹²⁾

が、地表で横ずれ断層と正断層に分岐するモデルが提唱されている。

その他、2010年El Mayor-Cucupah地震や2014年南ナパ地震(M6.2)など海外の地震においても、干渉SARとLiDAR解析によって、センチメートルオーダーの小変位がマッピングされ、幅広く複雑な地震断層分布が明らかになった。

これら最近の事例からわかったことは、図1に模式的に示したような主断層・分岐断層・副断層を明示的に区分できる場合は少なく、むしろ地表地震断層が幅広く現れる場合が多いという事実である。これは、重要構造物の断層変位ハザードを評価する際にきわめて重要である。

4. 受動変位と「活断層」の再定義

リモセン技術の向上で、震源断層から遠方でも断層変位が検出されるようになった。遠地誘発変位である(図1)。オフフォルト余震(誘発地震)とは異なり、地震活動を伴わないことが特徴である。その例として、2007年7月16日新潟県中越沖地震(M6.8)が挙げられる。同地震では、干渉SAR解析によって震央から約10km南西に位置する西山丘陵で帯状の隆起が確認された¹³⁾。この隆起帯は、地質図に示されている小木ノ城背斜に沿って生じ、直下位置する長さ9.9km、幅1.8kmの断層が10cmの逆断層変位を起こしたとされる。本震による静的応力変化によって浅いすべりが誘発されたと推定されている。

地震活動をともなわない数cm以下の遠方誘発変位は、カリフォルニア州でたびたび報告されている。震源から100km以上も離れた場所で生じることもあり、多くはサンアンドレアス断層帯、特にクリープ区間で顕著である¹⁴⁾。

熊本地震でも、布田川・日奈久断層帯以外に200個所以上で小変位が誘発されたことが確認された¹⁵⁾。小

変位といえども変位量は最大40cm以上にもおよぶ。そのなかには、すでに活断層と認識されていたものも多数含まれ、すべての活断層が必ずしも個別に大地震を起こさず、受動的に変位することが明らかになった。

一方で、M6程度でも地震断層が出現する場合がある。2016年12月28日に発生した茨城県北部の地震(M6.3)では、干渉SAR解析によって北西-南東走向の長さ約3kmの干渉縞の不連続が確認された。現地踏査から、最大5cmの西側低下と約10cmの水平東西伸張が確認された¹⁶⁾。1980年代以前には地表に痕跡を残さない地震にされたであろう。特筆すべきは、この地震断層は2011年3月19日のM6.1地震時にも変位したことで、短い断層がわずかに約6年間隔で繰り返し変位したことになる。その原因は2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震とその余効変動による急激な歪変化によるものと指摘されている¹⁷⁾。きわめて短期間でM6程度

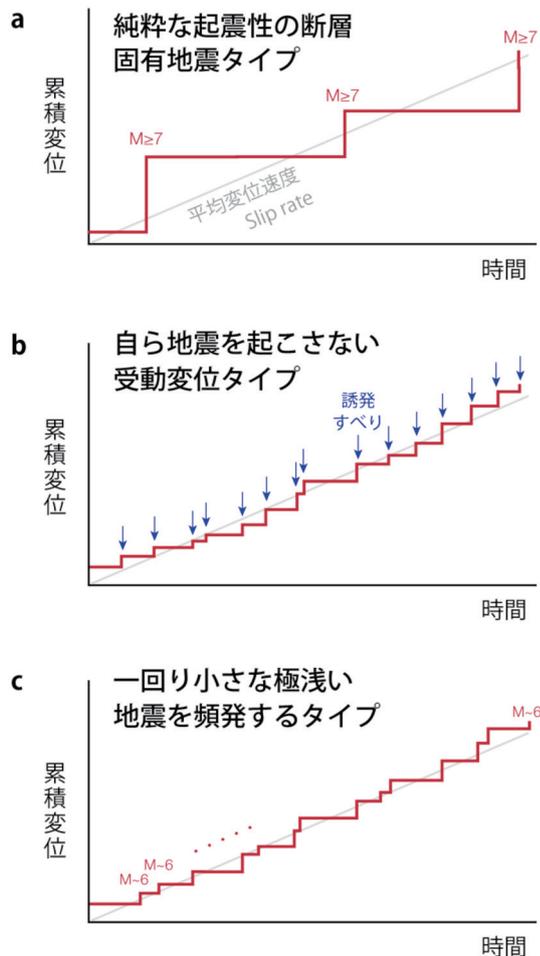


図4 考えられる活断層のタイプ a) 従来の固有地震タイプのモデル。1つの活断層が繰り返し大地震を起こす。b) 近隣の活断層による大地震により、大地震を起こすことなく断層変位が蓄積する。c) M6程度の小さな地震を頻発させながら、断層変位が蓄積する。短い活断層のタイプ。

の地震を繰り返した活断層が検出されるのも干渉SARによる成果といえる。

これらの活断層沿いの遠地誘発変位やM6程度で出現する地震断層の例などから、活断層に対する見方が変わりつつある(図4)。例えば、1)活断層は必ずしもそれぞれ単独でM7地震を起こさず、周囲の大きな活断層の活動に付き合っ少し変位し、その繰り返しによって断層変位地形が形成される。2)M6前後程度の地震であっても小変位を伴い、その動きの繰り返しによって短い活断層が形成される。すなわち、短い活断層すべてにM7程度の地震を割り当てる必要はない。

5. ノンテクトニック断層の抽出と排除

干渉SARと差分LiDAR解析によって、震源過程に直接関係しない表層(数m~数十m程度)の地表変状を見分けることも可能になった。いわゆる「ノンテクトニック断層」である。ノンテクトニック断層とは、地すべりや液状化に伴う側方流動など、主として重力作用によって表層のみに生じる断層のことである。従来、現地踏査ではテクトニックな地震断層との区別が困難な場合も多く、研究者による地震断層分布の相違の原因になっていた。

例えば、2016年熊本地震では、阿蘇カルデラ内北西の内牧地区で見られた大規模な北東走向の正断層地溝型の断層帯が見られた(図5)。これらの断層帯は、地下50mの水平な滑り面によって数km²の土塊が水平移動した結果であることが干渉SAR解析と温泉ボーリングから示さされている¹⁸⁾。差分LiDARによる同様の指摘もある¹⁹⁾。リモセンによって地表変状周辺の土塊の移動量やその広がりを把握することによって、地震断層との区別が容易になったといえる。



図5 熊本地震ともなつて阿蘇カルデラ内牧温泉付近に生じた地盤側方移動に伴う陥没(熊本大学鳥井真之特任准教授撮影)

6. おわりに

活断層研究の分野では、未だにボーリングやトレンチ調査など、土や岩石を直接接触して確認する作業が続いている。革新的な技術は登場していないように思える。一方で、リモセン技術の目覚ましい発展によって、最近では測地学者から活断層の本質を教えられることが多くなった。今後、活断層と内陸地殻内大地震の関係性を十分に理解し、適切なハザード評価につなげるためにもするためにも、リモセンに携わる測地学者、活断層研究者、地震研究者、地震工学者間で議論の機会を増やしていく必要がある。

謝辞

本報告は、平成29年度京都大学防災研究所一般研究集会「リモートセンシング技術の進展と活断層・内陸地震研究」での議論に負うところが大きい。研究集会共同コンピナーの橋本学氏、福島洋氏、参加者の方々に感謝申し上げる。

参考文献

- 1) 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケーリング則-地震断層の影響および地震被害の関係-。地震、2、Vol.51、pp.211-228、1998.
- 2) Schwartz, D. P. and Coppersmith, K. J. : Fault behavior and characteristic earthquakes: examples from the Wasatch and San Andreas fault zones. Jour. Geophys. Res., Vol.89, pp.5681-5698, 1984.
- 3) Massonnet, D. et al. : The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, Nature, Vol. 364, pp.138-142, 1993.
- 4) Kondo, H. et al. : A fault scarp in an urban area identified by LiDAR survey: A case study on the Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line central Japan, Geomorphology, Vol. 101, pp. 731-739, doi:10.1016/j.geomorph.2008.02.012, 2008.
- 5) Zielke, O. et al. : Slip in the 1857 and earlier large earthquakes along the Carrizo Plain, San Andreas fault, Science, Vol. 327, pp. 1119-1122, 2010.
- 6) Bevis, M., et al. : The B4 Project: Scanning the San Andreas and San Jacinto fault zones, Eos Trans. AGU., Vol. 86(52), Fall Meet. Suppl., Abstract H34B-01, 2005.
- 7) Mukoyama, S. : Estimation of ground deformation caused by the earthquake (M7.2) in Japan, 2008, from the geomorphic image analysis of high resolution LiDAR DEMs, J. Mt. Sci., Vol. 8, pp. 239-245, doi:10.1007/s11629-011-2106-7, 2011.
- 8) 遠田晋次ほか：2008年岩手・宮城内陸地震に伴う地表地震断層-震源過程および活断層評価への示唆-。地震、2、Vol.62、pp.153-178、2010.
- 9) 丸山正ほか：2008年岩手・宮城内陸地震に伴い岩手県奥州市国見山南麓に出現した地震断層北端部の性状、活断層研究、Vol. 34、pp.1-12、2011.
- 10) 熊原康博ほか：2016年熊本地震に伴う地表地震断層の分布とその特徴、2016年5月25日、日本地球惑星科学連合連合大会2016年大会講演要旨、2016.
- 11) Toda et al. : Slip-partitioned surface ruptures for the Mw 7.0 16 April 2016 Kumamoto, Japan, earthquake, Earth, Planets and Space, Vol. 68, 188, doi: 10.1186/s40623-016-0560-8, 2016.
- 12) Fukushima, Y. et al. : Complex ruptures of the 11 April 2011 Mw 6.6 Iwaki earthquake triggered by the 11 March 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake, Japan, Bull. Seismol. Soc. Amer., Vol. 103, no. 2B, doi:10.1785/0120120140, 2013.
- 13) Nishimura, T. et al. : Episodic growth of fault-related fold in northern Japan observed by SAR interferometry, Geophys. Res. Lett., Vol. 35, L13301, doi:10.1029/2008GL034337, 2008..
- 14) Wei, M. et al. : Slip on faults in the Imperial Valley triggered by the 4 April 2010 Mw 7.2 El Mayor-Cucapah earthquake revealed by InSAR, Geophys. Res. Lett., doi:10.1029/2010GL045235, 2011.
- 15) Fujiwara, S. et al. : Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry, Earth, Planets and Space, Vol.68, 160, 2016.
- 16) 栗田泰夫、吾妻崇：「2016年12月28日茨城県北部の地震 (Mj 6.3)」の現地調査報告、<https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/ibaraki2016/report20170105.html>、2017.
- 17) Fukushima et al. : Early recurrence of an M6 intraplate earthquake (5.8 years) observed in northern Kanto region, Japan, after the 2011 Tohoku-oki earthquake, IAG-IASPEI 2017, Abstract Book, J05-5-01, http://www.iag-iaspei-2017.jp/files/IAG-IASPEI2017_abstracts.pdf, 2017.
- 18) Tsuji, T. et al. : Horizontal sliding of kilometre scale hot spring area during the 2016 Kumamoto earthquake, Scientific Reports, Vol.7, 42947 doi: 10.1038/srep42947, 2017.
- 19) 向山栄ほか：2時期の航空レーザ計測地形データ解析による平成28年(2016年)熊本地震前後の阿蘇カルデラ地域における地表変位、日本応用地質学会、熊本・大分地震災害調査団調査報告速報版その2、http://www.jseg.or.jp/00-main/pdf/20160822_kumamoto_rep.pdf、2016.



遠田 晋次 (と お だ し ん じ)

1989年鹿児島大学理学部卒業、1991年東北大学大学院理学研究科前期博士課程卒業(修士)、(財)電力中央研究所、東京大学地震研究所助手、(独)産業技術総合研究所活断層研究センター研究員、京都大学防災研究所准教授を経て2012年10月より現職。博士(理学)、専門分野は地震地質学。

リモートセンシングによる津波の広域被害把握

越村 俊一

●東北大学災害科学国際研究所 教授

1. はじめに

巨大災害後の対応や被災地での救援活動において最も重要なことの一つは被害の全容把握である。地震や津波といった巨大災害の発生直後は、激甚な被害を受けた地域からの情報が断片的となり、被害の全容把握が極めて困難になるとともに、被災地での救援活動や復旧活動も難航する。2011年東北地方太平洋沖地震津波の被災地は広大で、発災直後に激甚な被災地がどこにあるかを把握することが不可能であった。現地での被害把握に関する対応は、調査期間や人的資源の制約により限界があるため、被災地外からの被害把握が必要である。

本稿では、近年技術的発展が著しいリモートセンシングを活用することにより、上記問題のブレークスルーを図るための技術的アプローチについて、2011年東北地方太平洋沖地震津波災害以後の研究について、著者らの研究成果に基づき概説する。

2. 津波の広域被害把握のためのプラットフォームとセンサ

津波の広域被害把握について、本稿では、特に津波浸水域と建物被害・瓦礫の空間的分布およびその規模の把握について述べる。表1に広域被害把握に用いられるセンサ・プラットフォーム、および解析手法についてまとめる。災害リモートセンシングに利用されるプラットフォームは、現在では人工衛星から航空機、無人機など、幅広い選択肢がある。センサについては、主に可視光・近赤外を捉える光学センサ、合成開口レーダ、LiDAR (Light Detection and Ranging) が用いられる。把握したい項目や用途、把握したい時期、空間スケールに応じてセンサ、プラットフォームを使い分ける必要がある。なお、解析手法については、参考文献の文献番号を付してあるので、詳細については原著論文を参照されたい。

3. 津波の浸水域および陸上遡上特性の把握

広域被害把握という観点では、津波浸水域および陸上の津波の振る舞い（遡上特性）をどのようにして把握するかが最初の課題である。2011年東北地方太平洋沖地震発生直後には、複数の機関による緊急観測が

実施された。例えばJAXAは2011年当時、陸域観測技術衛星「だいち」を運用しており、標高などの地表の地形状況を把握するパンクロマチック立体視センサ(PRISM)、土地被覆や土地利用状況の把握のための可視近赤外放射計2型(AVNIR-2)、および昼夜を問わず陸域観測が可能なLバンド合成開口レーダ(PALSAR)の3つの地球観測センサを搭載していた。AVNIR-2センサは、RGBの可視光の3バンドに加え、近赤外のセンサもあり、地上分解能は直下視で10mである。

図1に、2011年3月14日に撮影されたALOS AVNIR-2の画像を用いて作成した浸水域図を示す¹⁾。津波の浸水域の抽出に、水の分光特性に着目した指標を用いて、現地調査結果を用いてキャリブレーションした。

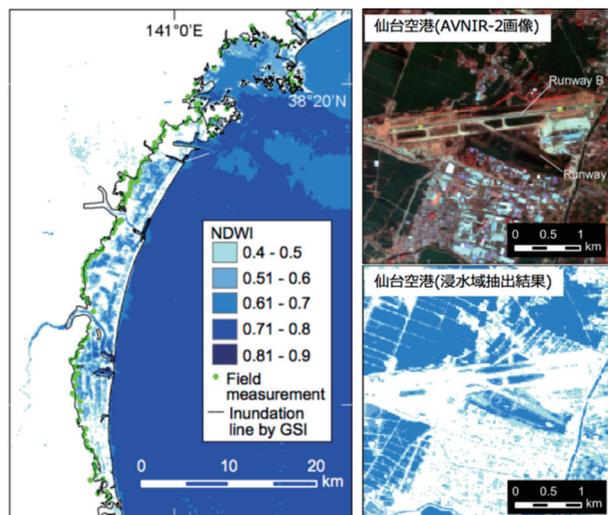


図1 ALOS AVNIR-2の画像から推定した津波浸水域¹⁾。実線は国土地理院が航空写真から抽出した浸水ライン、緑点は現地調査結果。

一方、昼夜を問わず観測が可能な合成開口レーダ(SAR)による浸水域抽出技術にも期待が高い。マイクロ波の散乱強度を計測する場合、浸水域はマイクロ波の鏡面反射により、後方散乱強度は低下する。その特性を利用して、被災前後の水域変化の抽出をうまく捉えることで浸水域の抽出が可能になる。図2に示すのは、ドイツのXバンド合成開口レーダTerraSAR-Xの被災前後の画像を用いて、浸水域の自動抽出を行った結果である²⁾。

さらに、現地の津波の来襲状況の映像がリアルタイムで得られる機会が増えつつある。

表1 津波の広域被害把握のためのセンサ・プラットフォーム (数字は文献番号)

抽出内容	センサ・プラットフォーム	解析手法
陸上遡上特性	空撮ビデオ	目視判読、エッジ抽出 ³⁾
浸水域	航空写真、無人機、衛星センサ (光学)、合成開口レーダ	目視判読、画像フィルタ ¹⁾ 、変化抽出 ²⁾
建物被害	航空写真、無人機、合成開口レーダ	目視判読 ⁴⁾ 、変化抽出 ⁵⁾ 、 ⁶⁾ 、機械学習、深層学習 ⁷⁾
瓦礫量	航空写真、衛星センサ (光学)、合成開口レーダ、LiDAR	機械学習 ⁸⁾ 、3次元計測 ⁸⁾ 、 ⁹⁾
被災者捜索	無人機	画像認識、機械学習 ¹⁰⁾

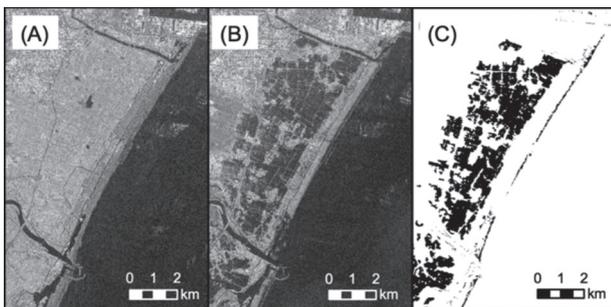


図2 TerraSAR-X画像を用いた仙台市の津波浸水域の自動抽出結果²⁾。(A)被災前のTerraSAR-X画像、(B)被災後のTerraSAR-X画像、(C)抽出した浸水域。

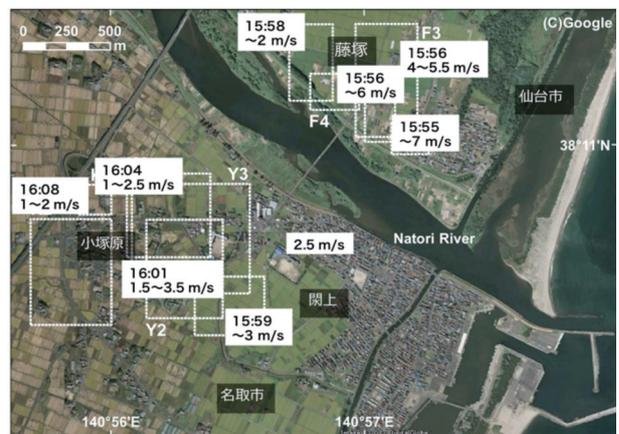


図3 空撮画像から把握した津波先端部の遡上速度³⁾。

リアルタイムで得られる空撮映像から分かることは、特に、陸上における津波の流速情報は、建物に作用する流体力の定量的評価や津波数値計算の再現性の検証に有用である。例えば、著者らはNHKにより仙台市・名取市上空で撮影された津波来襲時の映像に二次元射影変換を施し、津波先端部の陸上遡上速度を把握する手法を確立した³⁾。図3にその結果を示す。従来では不可能であった極めて局所的な津波の氾濫速度や建物への衝撃力も把握することが可能になった。

4. 建物被害の把握

建物被害把握手法には多くの研究の蓄積がある⁴⁾⁹⁾。対象となる領域のスケール、得られるデータやセンサの特性に応じて使い分けることが可能になっている。

例えば、発災直後に取得が可能になりつつある航空機・無人機による写真は、目視での解釈・判読が可能である。著者らは国土地理院が撮影した宮城県の被災地の航空写真を用いて、県内16万棟の建物被害を目視判読により抽出した⁴⁾。人の目で解釈・判読するので時間がかかるのが難点であるが、近年急速に発展している機械学習・深層学習の応用で、容易に自動化が進みつつあるので、問題はすぐに解消されるだろう。

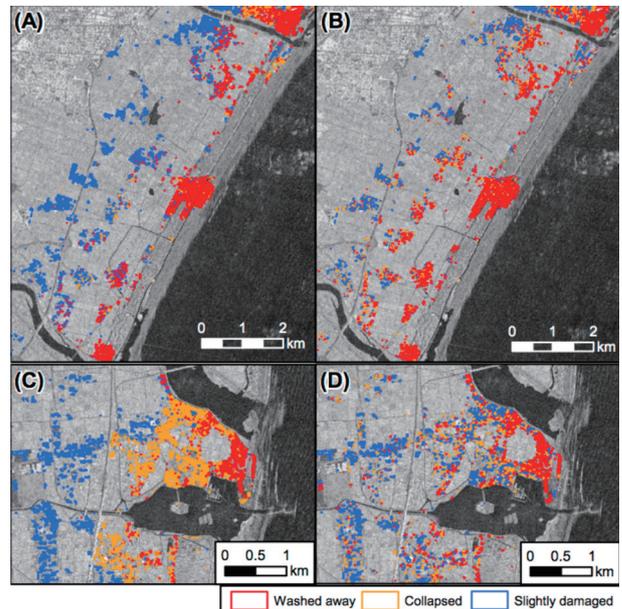


図4 仙台市と亶理町における津波による建物被害の抽出結果⁶⁾。(A)と(C)が調査結果、(B)と(D)がTerraSAR-X画像からの被害抽出結果である。

昼夜・天候を問わず観測が可能な合成開口レーダを利用して、建物被害の量的な把握を可能とする手法も整備されてきた。最も知見の蓄積が進んでいるのが変化抽出法である⁵⁾。被災前後に撮像された画像データセットの変化(画素値の差分や相関係数)と建物被害程度を関連づけ、変化量に対する閾値の決定や分類器を構築するのが一般的である。図4に示すのは、2時期のTerraSAR-X画像から建物域をまず抽出し、Decision Tree法に基づく分類器(Classifier)を構築して津波被災地の建物被害抽出に適用した例である。流出建物抽出に関して80%の正解率で把握が可能であることが実証されている⁶⁾。ただし、この変化抽出法が優れた結果を示せるのは、被災前後のデータが同じ撮像条件で得られた場合に限られる。被災後の画像しか得られていない場合に適用できないのが難点である。

この欠点を克服し得るのが、機械学習や深層学習である⁷⁾。事前に建物被害の学習データを整備するか、被災直後の限られた被害データを用いて学習し、被災後のデータからのみから建物被害を抽出する手法開発が進められており、一定の成果が得られている。例えば、図5に示すのは、SqueezeNetというDNN(Deep Neural Network)を用いて建物域を抽出した後にwide residual networks(Wide ResNet)という畳み込みニューラルネットワークのアーキテクチャを用いて被害を分類した結果である。変化抽出法と遜色ない結果(総合精度約75%)を得ており、適切な学習データを整備することで正確・詳細かつ迅速な被害把握が可能となる。

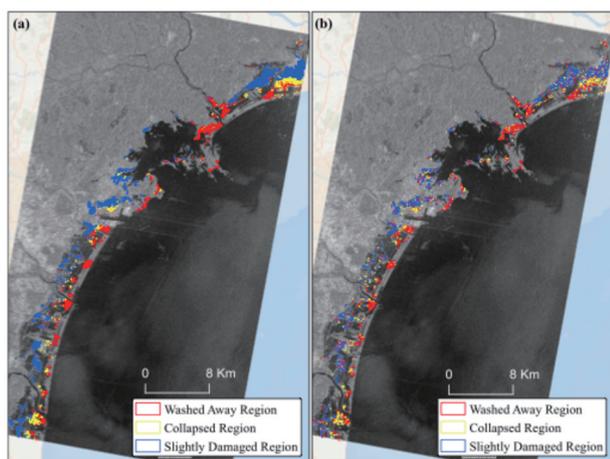


図5 深層学習により、被災後のTerraSAR-Xデータのみから得られた建物被害抽出結果⁷⁾。(a)建物被害調査結果、(b)深層学習による被害抽出結果

5. 瓦礫の把握

リモートセンシングの特徴と利点には、広域性(広い領域を観測できること)と周期性(一定の時間間隔

で同じ場所を観測できること)、継続性(長期間観測を継続できること)が挙げられる。すなわち、災害発生直後の広域被害把握だけでなく、その後の被災地の広域モニタリングも可能である。例えば、東日本大震災の発生直後には、東北3県で2300万t以上の瓦礫が発生したと報告された。瓦礫の迅速な処理が災害復旧の迅速化において重要かつ喫緊の課題であり、そのためには正確な瓦礫量の推計が必要である^{8),9)}。

著者らは、航空写真とLiDARデータから、瓦礫の堆積・分布を3次元的かつ定量的に把握する手法を開発した⁸⁾。まず、航空写真のオブジェクトベース解析により、裸地・植生域・瓦礫域の分類を行う。2次的に抽出された瓦礫域に対してLiDARデータからの数値標高モデルを統合することで、瓦礫体積の3次元的な判読を可能にした。図6に示すのは、宮城県女川町における瓦礫の3次元抽出を行った結果である。同領域内の瓦礫の総体積は23.8万m³と推定され、瓦礫の嵩比重1.2t/m³(国立環境研究所発表)を考慮すると、総重量28.6万tの推定値を得た。

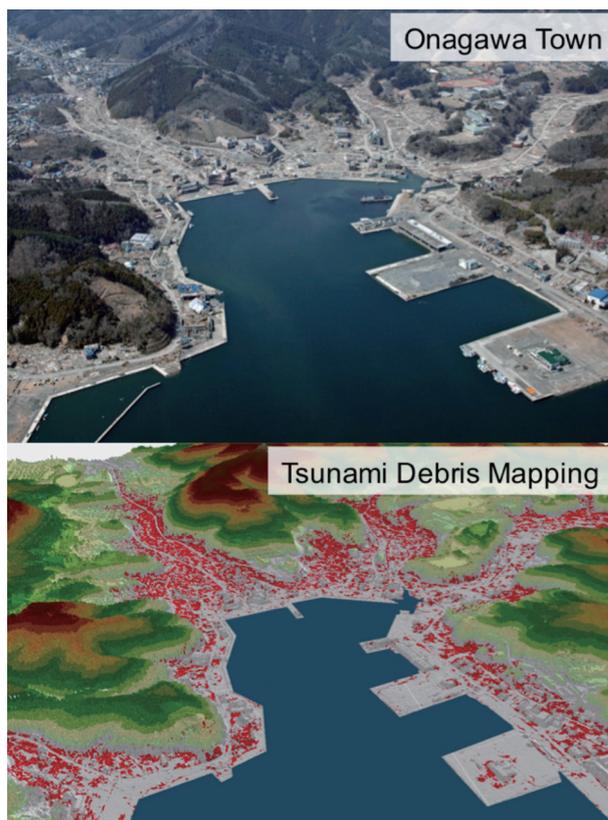


図6 女川町全域の瓦礫分布の3次元把握結果⁸⁾。上は女川町市街地地域の鳥瞰写真、下が瓦礫の分布(推定)である。

瓦礫を現場で直接計測し、その空間的な分布の把握を定期的・継続的に行うことは困難であり、被災直後の航空写真撮影とLiDAR測量を実施すれば、瓦礫量を

迅速かつ定量的に把握可能であることが示された。

6. UAV (ドローン) による被災者探索

2011年東日本大震災後に、被害把握をUAV (ドローン) により実施する技術が確立されてきた。飛行時間が短く風雨に弱いという欠点もあるが、人が立ち入れない領域を調べることができるのは大きな利点である。

被害把握に加えて大きく期待できるのは、被災者の探索である。大規模な津波災害の被災地では、被災者が避難先の高台や建物などに取り残され孤立する事態が数多く発生しており、彼らの早期発見は人命救助の観点から極めて重要である。有人機が探索・救助どちらも行うことは非効率であり、サイレントタイム確保の観点からも、有人航空機の活用には課題がある。無人機による探索・探索と有人機を用いた救助が連携できれば、孤立した被災者の救助の技術が大きく進むはずである。人の検出には、オブジェクト分類、影検出、HOG (Histograms of Oriented Gradients) 特徴量を用いた機械学習を併用することで人の識別器を構築することは可能である¹⁰⁾。

7. おわりに

津波の広域被害把握のためのリモートセンシングの活用について、浸水域・遡上特性の把握、建物被害の抽出、瓦礫の把握、被災者の探索という課題に着目して、研究の現状と展望について概説した。多様なプラットフォームの利用、センサ性能と分解能の向上、情報通信技術の発展、機械学習・深層学習による画像認識のAI化により、今後の飛躍的な発展が期待できる。

課題は、観測の迅速性の確保であろう。例えば人工衛星によるリモートセンシングにはコンステレーションの問題がある。災害直後に迅速に被災地を撮像できる衛星を自国のものだけでまかなうことは不可能であるから、国際的な協調が必要であり、センシング、解析技術の標準化も必要になる。また、無人機についてもタフな状況下での機動性が求められる。ハードウェアの開発、センサの開発、解析技術・解釈法の確立を連携して行うと同時に、最も重要なユーザーニーズに応えながら、様々な災害現場での実証が必要である。

参考文献

- 1) Koshimura, S., S. Hayashi, H. Gokon: The impact of the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster and implications to the reconstruction, *Soils and Foundations*, 54(4), 560–572, 2014
- 2) 郷右近英臣, 越村俊一, 松岡昌志: 合成開口レーダー

画像による津波浸水ラインの半自動抽出ツールの開発, *土木学会論文集B2*, 70(2), I_1486-I_1490, 2014

- 3) Hayashi, S., S. Koshimura: The 2011 Tohoku Tsunami Flow Velocity Estimation by the Aerial Video Analysis and Numerical Modeling, *Journal of Disaster Research*, 8(4), 561-572, 2013
- 4) Gokon, H., S. Koshimura: Mapping of Building Damage of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami in Miyagi Prefecture, *Coastal Engineering Journal*, 54(1), 1250006, 2012
- 5) Liu, W., F. Yamazaki, H. Gokon, S. Koshimura: Extraction of Tsunami Flooded Areas and Damaged Buildings for the 2011 Tohoku, Japan Earthquake from TerraSAR-X Intensity Images, *Earthquake Spectra*, 29, 183-200, 2013.
- 6) Gokon H., J. Post, E. Stein, S. Martinis, A. Twele, M. Muck, C. Geiß, S. Koshimura, M. Matsuoka: A Method for Detecting Devastated Buildings by the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Using Multi-temporal TerraSAR-X Data, *IEEE Geoscience and Remote Sensing letters*, 2015, doi:10.1109/LGRS.2015.2392792
- 7) Bai, Y., C. Gao, S. Singh, M. Koch, B. Adriano, E. Mas, S. Koshimura: A Framework of Rapid Regional Tsunami Damage Recognition from Post-event TerraSAR-X Imagery Using Deep Neural Networks, *IEEE Geoscience and Remote Sensing letters*, 2017. doi:10.1109/LGRS.2017.2772349
- 8) 福岡巧巳, 越村俊一: 航空写真とLiDARデータの統合解析による津波瓦礫の3次元マッピング, *土木学会論文集B2*, 69(2), I_1436-I_1440, 2013
- 9) Koyama, C. N., H. Gokon, M. Jimbo, S. Koshimura, M. Sato: Disaster debris estimation using high-resolution polarimetric stereo-SAR, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 120, 84-98, 2016
- 10) 佐藤遼次, 越村俊一: UAVを用いて撮影した光学画像における人検出の精度向上, *地域安全学会論文集*, 27, 293-301, 2015



越村 俊一(こしむら しゅんいち)

東北大学災害科学国際研究所・教授
2000年東北大学大学院博士後期課程修了、博士(工学)。人と防災未来センター専任研究員、東北大学准教授を経て現職。専門分野：津波工学、数値シミュレーション、リモートセンシング

メキシコ中部地震によるメキシコシティの被害概要

清田 隆

●東京大学生産技術研究所 准教授

1. はじめに

2017年9月19日13時14分(現地時間)、メキシコシティから南東約100kmの地点を震央としたメキシコ中部地震(Mw7.1、震源深さ約51km)¹⁾が発生した。地震による犠牲者は370名であり、震源に近い地域でも被害は大きかったが、震源からやや距離のあったメキシコシティでは観測された最大加速度が70~120galであった²⁾にもかかわらず、約230名が亡くなっている。

震源からの距離が遠くても大きな被害が発生するメキシコシティの脆弱性は、構造物の問題だけでなく地盤構造も大きく影響している。アステカ帝国の終焉以降に埋め立てられた湖の上に位置するメキシコシティは、軟弱な埋立地盤による地震動の増幅・反射により、1985年メキシコ地震(Mw8.0)では震源距離300kmであったにもかかわらず甚大な被害が発生した。

奇しくも1985年の大地震と同日に発生した今回の地震による犠牲者の多くは、5~10階建の中高層構造物の倒壊に巻き込まれたものであり、被害数は少ないものの被害の形態は1985年のケースと似通っていた。

本稿では、9月19日の地震発生から約一か月後の10月16~19日に実施された著者らによる現場調査により確認された被害の一部を紹介する。図1に調査のルートと震央位置を示す。

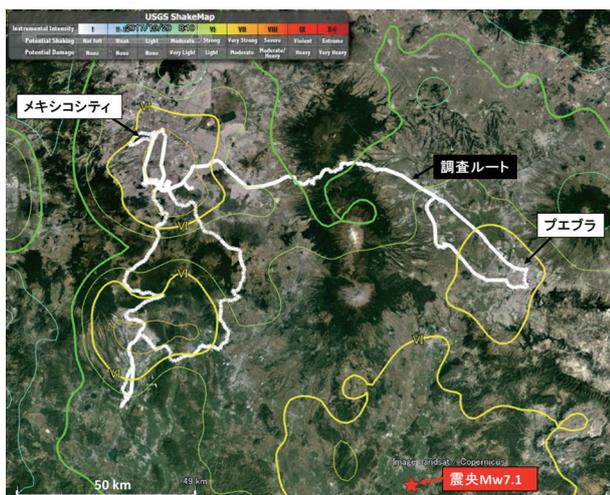


図1 震央位置・震度分布¹⁾と調査ルート

2. 構造物被害

メキシコシティの地形・地盤を反映した地形区分³⁾を図2に示す。エリアはZone I, II, IIIと分類され、Iは丘

陵地、IIIはかつて湖だった厚い埋立地盤である。その間のZone IIは過去の湖底に向かって基盤が傾斜する地域であり、今回の地震によるメキシコシティの構造物被害はこのZone IIに集中していた。一方、1985年の地震では、Zone IIIでの被害が顕著であった。

本調査中に各Zoneにて実施した常時微動計測より、Zone Iでは1.5Hz程度、Zone II, IIIでは1Hz程度にH/Vスペクトル比の卓越が認められ、地盤構造を反映する結果が得られている。

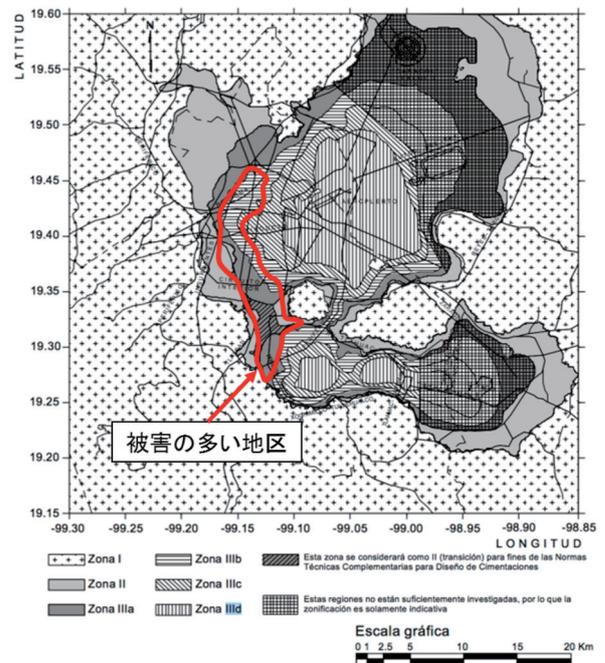


図2 メキシコシティの地形区分³⁾と被害地域

図3はZone IIで確認された倒壊前後の9階建て構造物である。瓦礫は撤去済みであったが、その構造は隣接構造物と同様、RCフレーム+組積壁の中高層ビルであり、街路区画の角地に位置していた。構造的に地震動に対する変形性能が低かったこと、および隣接構造物による拘束効果が期待できなかったことが推察される。更に、倒壊した建物は1985年のメキシコ地震でも被害を受けており、補修後に供用されたものであった。図3に示した事例は、今回の調査で確認された構造物被害の典型的な事例であり、大きな被害を受けた構造物の多くが上記の条件を満たしていた。

一方、隣接する構造物の影響を受けて大きな被害を



図3 地震前後の倒壊した建物の様子

受けた構造物も確認された。図4の8階建てのビルは6階部分のみに被害が集中していた。これは隣接するビルによる下部の拘束効果と高さの違いにより生じた事例と考えられる。



図4 6階部分に被害が集中した構造物

一方、1985年メキシコ地震時に被害を受けたものの、その後補修をしていなかった建物、および常時から継続している埋立地盤の圧密沈下により、今回の地震以前から傾斜していた建物が数多く確認された。このため、今回の地震により生じた被害のみを抽出するため、多くの聞き込み調査が必要であった。

3. 地盤変状に伴う被害

メキシコシティ南東部に位置するColonia del Marでは、地盤沈下に伴う道路、埋設管、および家屋の被害が発生した。被害の様子を図5に示す。地盤沈下の発生は一様ではなく、幅10~20m程度と局所的であり、本調査で確認された最大沈下量は1.3mであった。また、図5には街路で確認された沈下箇所の分布も示すが、沈下の帯が南北方向に連続している様子が伺える。

Colonia del Marは、メキシコシティが湖であった過去の面影を残す水路が残っていることで有名なXochimilco(世界遺産)にも近く、被災地は同様の低地を埋め立てて開発された住宅地である。今回の地震で

生じた沈下の帯は、埋没した水路の影響を受けている可能性があることを、今後の継続調査においては留意すべきであろう。



図5 住宅地で生じた地盤沈下の分布と被害の様子

4. おわりに

本稿ではメキシコシティ周辺の被害を紹介したが、今回の調査では震央に近いエリアで生じた落石被害、およびプエブラの市街地における構造物被害も確認している。それらの様子は、地震被害報告会資料⁴⁾を参照されたい。最後になりますが、本地震で犠牲となった方々のご冥福をお祈り申し上げます。

謝辞

本稿の内容は、土木学会・地盤工学会より派遣された緊急被害調査団(著者・Yolanda Alberto・京川裕之・大坪正英(以上、東京大学)、東畑郁生(関東学院大学))によって調査されたものである。

参考文献

- 1) USGS (2017): Magnitude 7.1 Earthquake in Mexico, <https://www.usgs.gov/news/magnitude-71-earthquake-mexico> (閲覧2018.1.31)
- 2) National Seismological Service (2017): Earthquake of September 2017, Puebla-Morelos (M 7.1), http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf (閲覧2018.1.31)
- 3) Government of Mexico City (2004): Complementary Technical Standards for Seismic Design.
- 4) 土木学会地震工学委員会 (2017): <http://committees.jsce.or.jp/eec2/node/111> (閲覧2018.1.31)

略歴

清田 隆(きよた たかし)

1994年豊田高専卒、基礎地盤コンサルタンツ(株)、東京理科大学助教等を経て現職、博士(工学)、専門分野: 地圏災害軽減工学

日本地震工学会・大会－2017報告

秋山 充良
●早稲田大学 教授

1. はじめに

「日本地震工学会・大会」は、土木・建築・地盤・機械・地震の各分野の研究者が横断的な討議を行うことを目的として開催している研究発表会であり、その第13回の大会が2017年11月13日・14日に東京大学生産技術研究所において開催されました。2日間の開催期間中の主な行事・セッションは、(1) 開会式・3件の基調講演、(2) 4つの横断セッションで計21名の方からの話題提供、(3) 国際セッションでの7編の発表を含む163編の一般発表と、優秀発表賞の授与、(4) 交流会、および(5) 地震工学技術フェアとなります。

今回の大会も、日本地震工学会の学会としての最大の特徴である分野横断的な会員構成を活かし、前々回、および前回の年次大会と同様に一つのホールを主会場として参加者が一堂に会して情報交換を行う形式で実施いたしました。大会開催中、290名（正会員134名、非会員44名、学生会員42名、学生非会員46名、招待講演者24名）の方々にご参加いただきました。論文数と参加者数の大会毎の比較を図1に示します。

本稿では、年次大会の概要をご報告します。

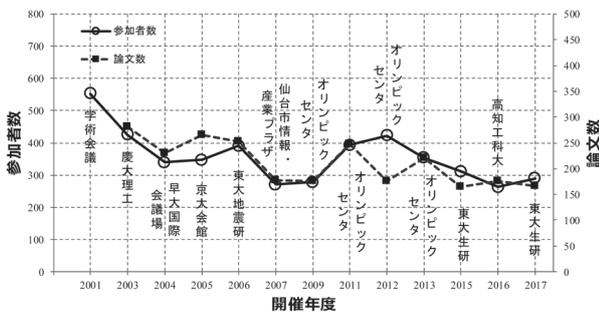


図1 大会の参加者数と論文数の推移

2. 開会式・基調講演

日本地震工学会 福和伸夫会長による開会あいさつの後、これまで地震工学分野を長らくリードされてきました3名の先生、川島一彦先生（東京工業大学名誉教授）、濱田政則先生（アジア防災センター センター長）、和田章先生（東京工業大学名誉教授）に基調講演をお願いしました。大変な熱意をもって大所高所からの示唆に富むご講演をいただきました（写真1）。

川島先生の講演題目は、「地震工学研究は橋の耐震性向上に何をもたらしたか?」でした。橋梁の耐震設計法の開発の歴史、兵庫県南部地震前にあった「M8クラスの大地震にも橋は壊れない」との過信が生まれた背景と大被害が生じた理由、そして現在はどのような思想で耐震設計がなされているのかについてご講演いただきました。講演の最後には、「私たちの世代が次の世代につたえるべきこと」と題したスライドをご提示頂き、「支承の耐震性・耐久性向上」、「長大橋をはじめとする特殊橋梁の耐震性」、「活断層によるズレに対する耐震対策の基本方針の策定」、そして「長周期地震動に対する耐震性」の研究の進化・深化が特に必要であることをご解説いただきました。

濱田先生は「臨海コンビナートの強靱化と課題」についてご講演頂きました。経済産業省は2014年（平成26年）から石油精製事業所を対象として「石油供給インフラ強靱化事業」を開始し、毎年約150億円の国費を投入して、石油タンク・パイプライン・護岸・地盤などの強靱化を進めていること、一方で、未だに幾つもの解決すべき課題が残されていることをご指摘されました。これらの産業施設はわが国経済の中核を担うもので、将来の地震・津波によって大きな被害を受けた場合、わが国のみならず世界経済に与える影響は極め

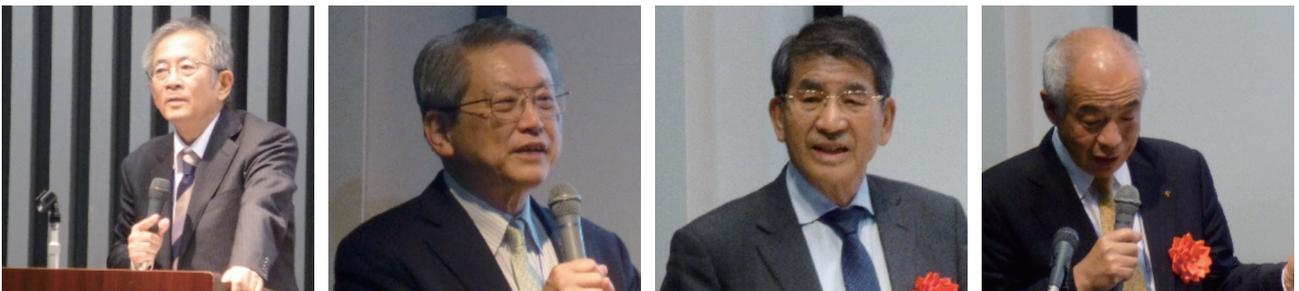


写真1 開会式・基調講演（左から、福和伸夫会長、川島一彦先生、濱田政則先生、和田章先生）

表1 横断セッションにおける講演者一覧

セッションA	<p>コーディネーター：運上茂樹(東北大学)</p> <p>講演者：</p> <ul style="list-style-type: none"> 堀宗朗(東京大学) 菅野高弘(海上・港湾・航空技術研究所) 白田裕一郎(防災科学技術研究所) 藤原広行(防災科学技術研究所) 片岡正次郎(国土交通省) ・野田利弘(名古屋大学) 久田嘉章(工学院大学)
セッションB	<p>コーディネーター：高橋良和(京都大学)</p> <p>講演者：</p> <ul style="list-style-type: none"> 岩田知孝(京都大学) ・小林正人(明治大学) 古屋治(東京電機大学) ・高橋良和(京都大学)
横断セッションC	<p>コーディネーター：山田博幸(電力中央研究所)</p> <p>講演者：</p> <ul style="list-style-type: none"> 高田毅士(東京大学) 高田孝(日本原子力研究開発機構) 藤本滋(神奈川大学) ・糸井達哉(東京大学) 成宮祥介(関西電力)
セッションD	<p>コーディネーター：堀高峰(海洋研究開発機構)</p> <p>講演者：</p> <ul style="list-style-type: none"> 堀高峰(海洋研究開発機構) 飯山かほり(東京大学) ・浅井光輝(九州大学) 井料隆雅(神戸大学) ・横松宗太(京都大学)

て深刻であり、国民生活に重大な支障を生じさせることを具体的な試算例とともに解説して下さいました。

和田先生の講演題目は「分からないことの多い地震動と構造物の鈍な耐震設計」でした。過去に多くの震災を受け、理学・工学分野の研究者は地震動の研究を何十年も努力してきているものの、次に起こる地震は自然が決めることであり、何時起こるのかや、どのような地震なのかを未だに事前に知ることはできないこと、耐震設計基準には、建物の高さに沿った最適な剛性分布および強度分布が示されているが、次に起こる地震は常に未知であり、その建物がどのように揺れるのかは分からないことをご指摘されました。地震動もよく分からず、構造物の挙動もよく分からない中で、耐震設計はもっと鈍感に行うべきであり、この状況での対策の好例として、東京工業大学すずかけ台キャンパスの耐震壁補強工事をご紹介くださいました。

3. 横断セッション

今回の年次大会では4つの横断セッションA～Dを企画していただきました。何れも時宜を得たテーマであり、各分野を代表する研究者から貴重な話題提供が



写真2 横断セッションA パネルディスカッション

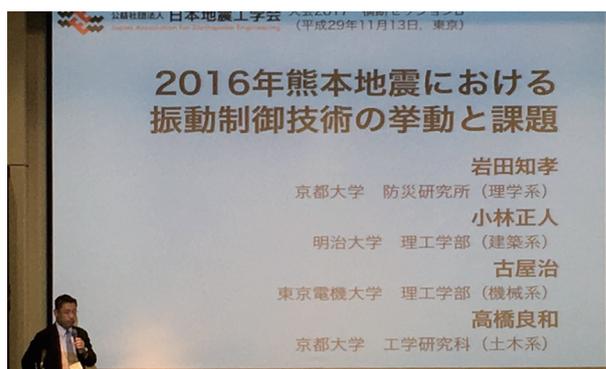


写真3 横断セッションB セッション開始時

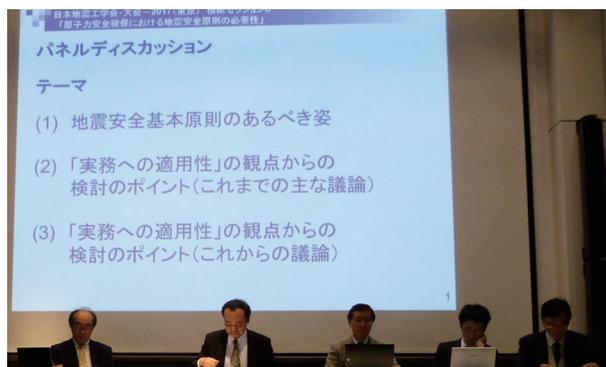


写真4 横断セッションC パネルディスカッション

なされました。何れの横断セッションにおいても、話題提供後には会場を交えた討議の時間が設けられ、登壇者を交えた熱心な議論が行われました(表1)。

横断セッションAのコーディネーターは、運上茂樹先生(東北大学)で、「災害情報の提供と利活用による地震災害に対する予防力と対応力の強化—SIPが目指す減災戦略—」と題したセッションを企画して下さいました(写真2)。SIP戦略的イノベーション創造プログラムの一つである「レジリエントな防災・減災機能の強化」の概要と、「地震災害の予測技術、予防技術、対応技術」に関する研究開発プロジェクトの中から、主に「予防技術」と「対応技術」に焦点をあて、その開発状況・社会実装に向けた計画等に関してそれぞれの研究リーダーからご紹介いただきました。また、本プロ

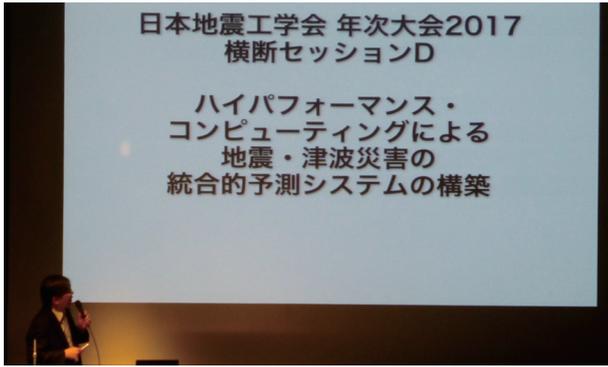


写真5 横断セッションD セッション開始時

グラムのポイントの1つとされている、研究開発における府省連携・分野連携の重要性とその課題に関する討議を会場も交えて行いました。

横断セッションB「2016年熊本地震における振動制御技術の挙動と課題」のコーディネーターは、高橋良和先生（京都大学）でした（写真3）。1995年兵庫県南部地震以降、免制震技術を含む構造制御技術の開発・適用が進められてきた中で、熊本地震においてそれらの振動制御技術がどれほど効果を発揮し、被害の軽減に寄与できたのかを検証するとともに、熊本地震で観測された長周期地震動を踏まえて、振動制御技術の今後の課題や展望について、理学・建築・機械・土木の各分野の専門家から話題提供して頂きました。

横断セッションCのコーディネーターは、山田博幸様（電力中央研究所）であり、「原子力安全確保における地震安全原則の必要性」について議論頂きました（写真4）。リスクと深層防護の概念を根幹に置いた、新しい地震安全の基本原則を構築するため、日本地震工学会内に「原子力発電所の地震安全の基本原則に関わる

研究委員会」が設置され、日本原子力学会との協働で活動されています。このセッションでは、地震安全基本原則の目的、概要、および委員会内の各WGにおける検討状況が報告され、その後、原子力発電所の安全確保に関して、会場を交えた討議の時間を持ちました。

横断セッションD「ハイパフォーマンス・コンピューティングによる地震・津波災害の統合的予測システムの構築」のコーディネーターは、堀高峰様（海洋研究開発機構）でした（写真5）。文部科学省ポスト「京」重点課題「地震・津波による複合災害の統合予測システムの構築」の一環として実施されている研究内容が紹介されました。強震動や津波による被害予測、さらには、被災による道路ネットワークの交通障害や企業活動への影響評価の取り組みが紹介され、次世代計算機を核とした分野横断の可能性を感じました。

4. 一般発表（ポスター・国際セッション）

2015年度より、年次大会の形式は変更となり、一つのホールを主会場として参加者が一堂に会し、ポスター発表による情報交換を行うようになりました。分野横断を図る日本地震工学会に相応しい発表形式と思い、2017年大会も国際セッションの英語による口頭発表を除き、ポスター発表としました。4つのセッションに分かれ、一つのセッションには約40件のポスターが示されました。何れのセッションも熱心な討議が発表者と参加者の間で行われておりました。

高知大会と同じ形式で、英語セッションを開催しました。英語セッションに対して17編の論文が投稿され、分野間のバランスを考慮して7編をオーラルセッション、10編をポスターセッションに振り分けました。



写真6 一般発表（ポスターセッション、国際セッション、授賞式）の様子

オーラルセッションの座長は、大会実行委員会委員でもある藤倉先生(宇都宮大学)、党先生(埼玉大学)、林先生(早稲田大学)です。最新の研究成果が英語で情報交換され、有意義なセッションとなりました。

英語セッションを含め、すべての発表者の中より優秀発表賞を8件選びました。各日の最後に授賞式の時間を設け、受賞者には、福和会長より賞状が授与されました(写真6、表2)。

5. 交流会

初日の夕方には、恒例の交流会も開催いたしました。50名近くの方にご参加頂きました。はじめに福和会長より開会の言葉があり、運上茂樹先生による乾杯を経て、歓談となりました。

途中には、柴田明德先生、和田章先生、家村浩和先生、中埜良昭先生、そして、幸左賢二先生からのご挨拶があり、最後は、次期実行委員会委員長である五十嵐晃先生に会を閉めていただきました。大変に活気のある盛況な交流会となりました(写真7)。

6. 技術フェア

企業参加による「地震工学技術フェア」も例年通り開催され、13社の企業(ブース番号順に、(株)アーク情報システム、(株)勝島製作所、(株)大林組、(株)サンエス、(株)東陽テクニカ、清水建設(株)、配水用ポリエチレンパイプシステム協会、白山工業(株)、(株)不動テトラ、前田建設工業(株)、(株)ミットヨ、(株)システムアンドデータリサーチ、戸田建設(株))より先端の技術展示を行っていただきました。

7. おわりに

大会にご参加くださいました皆様、また大会運営にご尽力いただきました大会実行委員会の委員の皆様、ならびに技術フェアにご出展いただきました企業の皆様に、深く感謝申し上げます。今回の年次大会が地震工学の発展に寄与するとともに、専門分野を超えた新たなネットワーク作りの一助となることを期待いたします。2018年は、第15回日本地震工学シンポジウムがあるため日本地震工学会・年次大会は開催されません。次回、第14回の年次大会は、2019年に京都にて開催となります。

謝辞：2017年の年次大会実行委員会委員長になることが決まり、早稲田大学内の会議場を予約しようとしたところ、2017年秋は耐震補強工事のため全館閉鎖となることを知りました。中埜良昭先生にご相談し、東京大学生産研究所内のホールをご予約頂きました。中埜

表2 年次大会2017 優秀発表者(敬称略)

番号	氏名(所属)	題目
E-5	Hamood ALWASHALI (東北大学)	EXPERIMENTAL STUDY OF MASONRY INFILLED RC FRAMES CONSIDERING THE INFLUENCE OF VARYING FRAME AND MASONRY STRENGTH
P1-12	原 千明 (東京電機大学)	液状化した地盤の揺動による被害を再現する振動台実験
P1-13	篠原 崇之 (パスコ)	平成28年熊本地震における液状化被害抽出手法の検討
P1-30	市川 義高 (早稲田大学)	摩擦振子型免震機構を有するRC柱の水平二方向震動実験および摩擦振子と滑り曲面の接触方法の違いがその地震応答特性に及ぼす影響
P2-7	小寺 祐貴 (気象庁)	S波の後に現れるP波を用いた緊急地震速報
P3-22	佐竹 高祐 (東京大学)	飛行時間中性子回折法を用いたRC部材の曲げ付着応力度の評価
P4-17	田中 亮磨 (東京理科大学)	繰り返し地震を受ける木質建物の変形増大に関する一検討
P4-29	森崎 裕磨 (金沢大学)	地震災害時における災害時要援護者の被災可能性に関する一考察 —国民健康保険データベースを活用して—



写真7 交流会の様子

先生には、会場準備の色々な場面で大変なお力添えを頂きました。また、清田隆先生、および清田研究室秘書の吉林聡子様には、会場運営に多大なるご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

【第13回年次大会実行委員会】秋山充良(委員長、早稲田大学)、五十嵐晃(副委員長、京都大学防災研究所)、藤倉修一(幹事、宇都宮大学)、糸井達哉(東京大学)、清田隆(東京大学生産技術研究所)、楠浩一(東京大学地震研究所)、千葉一樹(東急建設)、党紀(埼玉大学)、松崎裕(東北大学)、三上貴仁(東京都市大学)、林偉偉(早稲田大学)

第3回メディア交流会の報告

宮腰 淳一

●清水建設(株) 技術研究所

1. はじめに

日本地震工学会では、地震や被害想定に関する「情報」だけでなく、地震対策の最新技術の「現場」を知ってもらうことが、地震防災・減災を推進する上で重要だと考え、毎年メディア関係者と交流の場を持ち、地震工学について学ぶ機会を設けています。

2. 交流会の概要

今年は、2017年9月28日に第3回メディア交流会を開催しました。今回のテーマは「首都直下地震に備えるー都市ガスの供給と防災の最前線ー」で、都市ガス供給の事業者である東京ガスの本社ビルを訪問し、首都直下地震をはじめとした首都圏の大規模災害に対する防災システムと、ガスの供給停止から供給再開にいたるBCP対策の最前線を学びました。

当日はメディア関係者5名と学会関係者5名の合計10名の参加がありました。

交流会では、まず、宮腰事業企画委員長から開会の挨拶があり、引き続き、東京ガスの金井氏から、東京ガスの供給エリア・導管網について紹介がありました。また、LNG基地から高压導管、ガスホルダー、中圧導管、地区ガバナ、マイコンメータを経由して各家庭に供給されるガスの流れと各種設備について説明があり、さらに、大規模地震に備えるための、「予防」、「緊急」、「復旧」の3つの取り組みについて紹介がありました。

展示・体験室では、「予防」の取り組みの1つとして、高压・中圧ガス導管として採用される地盤変動の影響を受けにくく強度や柔軟性に優れた溶接接合鋼管や、低压ガス導管として採用される伸びが大きく破断しにくいポリエチレン管を、実際に見て触って理解しました。さらに「緊急」の取り組みとして、マイコンメータによるガス供給の自動遮断システムと、SUPREME（シュープリーム：超高密度リアルタイム地震防災システム）による、高密度に設置されたSIセンサーを利用した短時間での被害推定、遠隔操作による地区ガバナの供給停止のしくみを学びました。

また、供給指令センターや保安指令センターの実際の業務状況も見学し、日常の活動のリアルな状況を見せてもらいました。

見学中や見学後には、地区ガバナのバッテリーの保持時間や、遠隔操作の通信手段、他のガス事業者とのデータのやり取りなどに関して、活発な質疑応答や意見交換が行われ、非常に有意義な交流会となりました。

3. おわりに

本会では、こうしたメディア関係者との交流会を継続的に企画し、地震工学に関する認識を共有できるように努めていきます。

最後に、当日の案内役と講師を務めていただいた東京ガスの金井氏、新海氏ならびにご協力いただいた関係者の方々に心より謝意を表します。



写真1 講師の金井氏



写真2 展示室での見学風景

「強震動評価のための表層地盤モデル化手法」講習会 開催報告

津野 靖士

●公益財団法人鉄道総合技術研究所 副主任研究員

1. はじめに

2017年11月1日に東京工業大学田町キャンパスキャンパス・イノベーション・センターにおいて、日本地震工学会の主催により、「強震動評価のための表層地盤モデル化手法」講習会が開催されました。受講者には、強震動評価のための表層地盤モデル化手法の基礎から応用までを理解して頂けるように、研究委員会(強震動評価のための表層地盤モデル化手法研究委員会)が講習内容を企画し、97名(内3名、資料のみ送付)の方に申し込みを頂きました。

2. 講習会

講習会は、本研究委員会の活動の成果報告を含めて、強震動と表層地盤構造の関係、具体的な表層地盤モデル化手法、強震動評価への活用と課題について各講師に説明頂きました(表1)。当日は、非常に多くの方が参加され(写真1)、受講された方にはESG(Effects of Surface Geology on Strong Ground Motion)研究の理解を深めて頂けたと思っております。



写真1 講習会当日の会場の様子

3. アンケート結果

本講習会では、所属学会や職種、講習会の内容に関するアンケート調査を行い、78名の受講者から回答を頂きました。その結果、職種としては実務者と学生が大半を占め、講習会の満足度については大半の受講者が概ね満足したとの回答を頂きました(図1)。

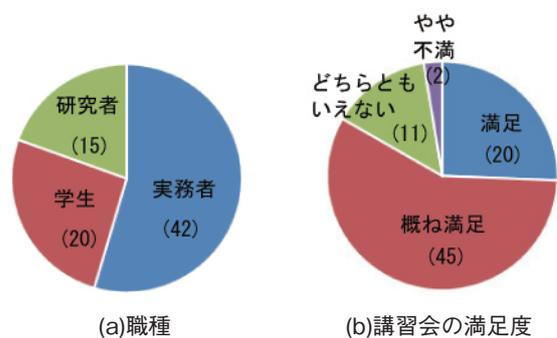


図1 アンケート集計結果

4. おわりに

本講習会を企画した強震動評価のための表層地盤モデル化手法研究委員会は2017年3月に活動を終了しましたが、2017年4月より、強震動評価のための深部地盤構造モデル化手法の検証に関する研究委員会(松島信一委員長)が立ち上がり、本委員会の成果報告を含めた形で、講習会やシンポジウムなどの企画を提案していきたいと考えております。

最後になりますが、日本地震工学会の小松康典氏には多大なご支援をいただきましたこと、心よりお礼申し上げます。

表1 講習会のプログラム

10:00~10:10	趣旨説明	東貞成(電力中央研究所)
10:10~11:10	強震動特性と表層地盤構造の関係	東貞成(電力中央研究所)
11:20~12:20	表層地盤モデル化手法 -単点微動とアレー微動解析、表面波探査-	松島信一(京都大学)
13:10~14:10	表層地盤モデル化手法 -地震データを利用した地下構造の同定-	池浦友則(鹿島建設)
14:20~15:20	表層地盤モデル化手法 -PS検層と室内材料試験-	金田一広(竹中工務店)
15:30~16:30	表層地盤モデルの強震動評価への活用と課題	川瀬博(京都大学)

「強震動評価のための表層地盤モデル化手法」講習会 参加記

堀 愛里香

●大成建設株式会社

／河合 亮太

●東京工業大学 修士一年

大成建設株式会社 堀愛里香

建造物の耐震性を評価するためには、建設地のサイト特性を適切に考慮することが重要であり、「表層地盤をどのように扱えばよいのか」について、非常に関心がありました。講習会では、「強震動と表層地盤構造の関係」といった基礎的な内容から、「微動」や「地震データを用いた地下構造同定」、「PS検層や室内試験」といった表層地盤モデル化に関する具体的な事柄まで幅広く取り扱われていました。その中で特に興味を持った内容は、表層地盤の非線形性を考慮した地盤の地震応答解析手法の講演でした。実際に、実務に携わりはじめて、工学的基盤から表層の応答増幅効果を反映させた入力地震波を作成する際に、精度良く評価するためには「どのようなモデルを選定すべきか」「実際に得られた地盤データを基にどのようにモデル化すべきか」と色々悩まされます。本講習の応答解析の事例を見ても、ただでさえ不均質な材料でばらつきが大きい地盤に、さらに動的な非線形特性を考慮してモデル化し、実現象に合わせていくことは簡単なことではないと改めて感じました。講習会を通じて、地震応答解析の高精度化を目指すのであれば、まずは地盤のばらつきの影響を把握し、地盤物性を精度よく評価することが(これがなかなか難しいことですが)重要ではないか等、色々と考えさせられ、大変勉強になりました。ESG研究の成果が、実務においても反映され、より適切な模擬地震動の作成等に役立てられる様、今後もこのような講習会を通じて、実務者に研究の成果を展開し、問題意識を持てる機会を設けて頂ければと思います。最後に、このような機会を設けて頂いた関係各位に深く御礼申し上げます。

東京工業大学 修士一年 河合亮太

現在私は修士論文のテーマとして地盤増幅の評価を行っています。今後の研究に役立たせたいと思い、平成29年11月1日に開催された「強震動評価のための表層地盤モデル化手法講習会」に参加させていただきました。

講習会は、5名の講師により表層地盤のモデル化手法に関する講義が行われました。

午前は、東講師から「強震動特性と表層地盤の関

係」、松島講師から「表層モデル化手法－単点微動とアレー微動解析、表面波探査－」の講義を受けました。

東講師からは、強震動に関する基礎的な確認から基盤が地震動に与える影響や近傍の2地点での揺れが異なる地震波形まで提示していただき、実感を得ながら講義を聴くことが出来ました。表層地盤が強震動に与える影響では、地盤の非線形性の説明も主要なトピックでした。松島講師の講義では表面波探査とアレー微動探査の基礎のおさらいと微動のH/Vの解釈の説明を受け、最後に事例を元に不整形地盤構造の推定が解説されました。

午後は、池浦講師から「表層モデル化手法－地震データを利用した地下構造同定－」、金田講師から「表層モデル化手法－PS検層と室内材料試験－」の講義を受けました。池浦講師からは地盤モデルの同定手法の説明が行われました。講義全体を通じ感じた重要な点は、どのような理論(ex,1D- 2D- 3D-波動論など)を前提として同定問題を解いているのかを常に意識しなければならないということです。金田講師からは、応答解析を例に等価線形解析の問題点や、結果が合わない要因の説明と、逐次非線形解析の手法について説明が行われていました。

最後に川瀬講師から「表層地盤モデルの強震動評価への活用と課題」と題して強震動予測における地盤増幅の重要性と、地震被害を主に与えるS波の増幅率の推定法が提案されました。これは拡散波動場を仮定した微動のH/Vから簡易に求める手法であり、松島講師の講義でもあったように、私は拡散波動場を仮定したH/Vの解釈をを始めて聞け、拡散波動場の理論に興味を持つことが出来ました。

本講習会は学生から実務者まで幅広い層に対して、基礎から応用まで説明があり、表層地盤のモデル化手法について理解を深めることが出来ました。また、自分の知らない知識や、講習会を聞いているだけでは理解できない点なども多く、今後の学習へのモチベーションになりました。このような機会を設けていただいた運営の皆様、「強震動評価のための表層地盤モデル化手法研究委員会」の皆様に感謝申し上げます。



本学会に関する詳細はWeb上で

日本地震工学会とは

日本地震工学会は、建築、土木、地盤、地震、機械等の個別分野ではなく、地震工学としてまとまった活動を行うための学会として2001年1月1日に発足しました。その目的は、地震工学の進歩および地震防災事業の発展を支援し、もって学術文化と技術の進歩と地震災害の防止と軽減に寄与することにあります。

ぜひ、皆様も会員に

本会では、これまでに耐震工学に関わってきた人々は勿論のこと、行政や公益事業に関わる人々、あるいは地域計画や心理学などの人文・社会科学に関する研究者、さらには医療関係者など、地震による災害に関わりのある分野の方々を対象とし、会員（正会員、学生会員、法人会員）を募集しています。本会の会員になることで、各種学会活動、日本地震工学会「JAE NEWS」のメール配信、地震工学論文集への投稿・発表・ホームページ上での閲覧、講習会等の会員割引など、多くの特典があります。ぜひ皆様も会員に、ホームページからお申込みください。

「学会の動き」欄は、下記のホームページでご覧いただくことにしました。

日本地震工学会の会則、学会組織、役員、行事、委員会活動、出版物の在庫案内など最近の活動状況などの詳しい情報はホームページをご覧ください。ホームページには、学会の情報の他に、最新の地震情報、日本地震工学会論文集など多くの情報が掲載されています。ぜひご活用ください。

入会方法や入会後の会員情報変更の詳細は本会ホームページ中の「会員ページ」に記載されています。

日本地震工学会ホームページ <http://www.jaee.gr.jp/>

会員ページ <http://www.jaee.gr.jp/members.html>



会誌への原稿投稿のお願い

日本地震工学会会誌では、「地域での地震防災に関する話題」、「地震工学に関連した各種学術会議・国際学会等への参加報告」、「興味深い実験や技術の紹介」、「当学会や会誌への要望や意見」等に関して、皆様からの原稿を募集しております。なお、投稿原稿は原則として未発表のものに限ります。また、「速報性を重視する内容（原則として年3回の発行であるため）」、「ごく限られた会員のみに関係する内容」、「特定の商品等の宣伝色が濃いもの」はご遠慮下さい。

投稿内容、投稿資格、原稿の書き方・提出方法等の詳細は、本会ホームページ中の「投稿・応募ページ」よりご確認頂けます。

日本地震工学会ホームページ 投稿・応募ページ <http://www.jaee.gr.jp/contribution.html>



登録メールアドレスご確認のお願い

当学会では、会員の皆様のお役に立つ会員限定のニュースやセミナー情報をメールにて配信させていただいておりますが、メールが届かず戻って来てしまうケースが散見されます。メールアドレスを変更された方、あるいは、このところ弊学会から1通もメールが届いていないという会員の方は、以下の方法で会員登録情報をご変更いただくか、事務局までご連絡いただきますようお願い申し上げます。

【会員登録情報のご変更方法】

日本地震工学会のWEBサイト (<http://www.jaee.gr.jp/jp/>) の「会員ログイン」より、会員番号とパスワードを入力してログインし、「登録情報の変更」を選択して登録情報をご変更ください。尚、会員番号またはパスワードがご不明な方は事務局までお問い合わせください。



お知らせ

JAE Newsletter 第7巻 第1号 (通算第20号) が2018年4月末に発刊されます。

次号では地震災害時の避難をテーマとし、研究事例からお役立ちグッズまで、幅広い情報をご紹介できるよう紙面を企画しています。

JAE Newsletter は、日本地震工学会誌を補完し、タイムリーに情報発信する目的で2012年9月に創刊されました。2015年より、会誌と連携した情報発信を行うため、会誌と交互となる4月、8月、および12月に学会のWebサイト上で発行しています。地震工学に興味を持つ一般の読者も意識したわかりやすい記事を通じて、地震工学と地震防災の一層の普及・発展を目指しています。

過去のJAE Newsletterについては以下のサイトに掲載していますので、ぜひご覧ください。

<http://www.jaee.gr.jp/jp/stack/1925-2/>

編集後記：

本号の特集では、近年進歩の著しいリモートセンシング技術とその応用について取り上げました。表紙でまず読者の皆様の目を惹くように、特集名を「ここまで見える！ リモートセンシングが拓く防災の新たな地平」としましたが、執筆者の方々からお寄せいただいた原稿を読み、散りばめられた数々の画像を見てみると、決して大袈裟な表現ではないと感じました。

特別寄稿として、昨年9月のメキシコの地震についての速報記事を掲載いたしました。その後も海外で大きな被害を伴う地震が発生しています。地震以外にも、日本では昨年秋の台風や本年2月の大雪など、災害救助法が適用されるような事態が発生しています。視野を広く持ち、怠らず災害への備えを進めなければならないと、改めて感じるところです。

末筆ながら、本号の記事をご執筆いただきました著者の皆様に心より御礼申し上げます。また、編集・校正の作業に尽力いただきました編集委員の皆様、関係各位にも御礼申し上げます。

平井 敬 (名古屋大学)

特集原稿の編集作業をしながら、23回目の「1月17日」を迎えました。見渡す限りの建物が倒壊している神戸市内で、災害の全体像がわからず、「一体どこから取材をしたらいいのか…」と途方にくれたことを昨日のように思い出します。山崎文雄先生が原稿の冒頭に書かれているように、阪神・淡路大震災を契機に地震の被害を俯瞰的に把握するリモートセンシング技術は大きく進展しました。本号の特集から、地震防災に貢献するリモートセンシング技術の高度化とその到達点、そしてこれからの可能性を読み取っていただければ担当幹事として何よりの喜びです。年末年始をはさみご多忙な時期にも関わらず原稿をご執筆いただいた著者のみなさま、編集・校正作業に携わってくださった委員のみなさまに心より御礼を申し上げます。

入江さやか (NHK放送文化研究所)

会誌編集委員会

委員長 平田 京子 日本女子大学

幹事 平井 敬 名古屋大学

幹事 入江さやか NHK放送文化研究所

委員 大淵 正博 竹中工務店

委員 桜井 朋樹 I H I

委員 鈴木比呂子 千葉工業大学

委員 高橋 郁夫 防災科学技術研究所

委員 高橋 典之 東北大学

委員 徳永 英 エーオンベンフィールドジャパン

委員 西村 隆義 ジェイアール総研エンジニアリング

委員 沼田 宗純 東京大学生産技術研究所

委員 肥田 剛典 東京大学

委員 古川 洋子 日本女子大学

委員 山田 真澄 京都大学防災研究所

日本地震工学会誌 第33号 Bulletin of JAEE No.33

2018年2月28日発行 (年3回発行)

編集・発行 公益社団法人 日本地震工学会

〒108-0014 東京都港区芝5-26-20 建築会館

TEL 03-5730-2831 FAX 03-5730-2830

©Japan Association for Earthquake Engineering 2018

本誌に掲載されたすべての記事内容は、日本地震工学会の許可なく転載・複写することはできません。

Printed in Japan