

## リモートセンシングの地震防災分野への利用

山崎文雄 (千葉大学)

## 1. はじめに

リモートセンシングは、宇宙や空中より、光や熱などの電磁波を観測するセンサを用いて、地表や大気の状態を把握する技術を指す。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。このような観測データの主な利用先は、従来は衛星画像の空間分解能が最大20-30m程度であったこともあり、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、地表における変状が広域にわたるものに限定されていた。取得されたデータの典型的な利用法の1つは災害前の現況を把握するもので、これは防災利用に限られたものではなく、都市計画や環境保全分野と同様の使い方である。もう1つの利用法は、災害発生後の被害状況の把握で、自然災害や人為災害、環境破壊なども含めて、地球表面の変化を観察するものである。

1995年阪神・淡路大震災以降、リモートセンシングの防災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)、マイクロ波、熱赤外などが代表的なものであり、これらの空間分解能が大きく向上したことが、利用が拡大した最大の要因といえよう。また、センサが対象地域に向きを変える機能が付加したために、災害を観測できる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、利用が広がった一因といえる。

本文では、リモートセンシングの防災利用における最新動向について紹介し、今後の発展の方向と課題について考えてみる<sup>(1)</sup>。

## 2. リモートセンシングの特徴

衛星リモートセンシングの大きな特徴としては、①広い範囲を瞬時に観測可能、②同じ地域を繰り返し定期的に観測することで時間変化を把握可能、③直接現地に行かずとも状況把握が可能、④人間の目で確認できない赤外線やマイクロ波も観測可能、などが挙げられている。これらの特徴はいずれも、防災分野においても、極めて重要なものばかりである。広域性・瞬時性は、たとえば関東平野くらいの範囲を一瞬で観測できるため、同時刻における被害の広がりや把握できる。反復性・定時性は、災害前の状況を知り、災害による

変化や復興状況の把握にも役立つ。遠隔性は、地上からのアクセスの困難な僻地や被災地の観測に有効である。可視光以外の利用は、SAR衛星の全天候利用や近赤外センサによる植生変化把握など、災害状況の把握に有効なことが知られている。

ここで、各種のセンサを搭載するプラットフォームを図1に示す。大気圏外のプラットフォームとしては、光学センサやSARを搭載した人工衛星、それに全球の標高データ(SRTM)作成に貢献したスペースシャトルなどが挙げられる。大気圏内では、固定翼航空機やヘリコプターが代表的なプラットフォームであり、航空カメラや各種センサが搭載される。火山噴火や原発事故など危険性を伴う空域の撮影に関しては、無人航空機(UAV)の使用も広がりつつある。

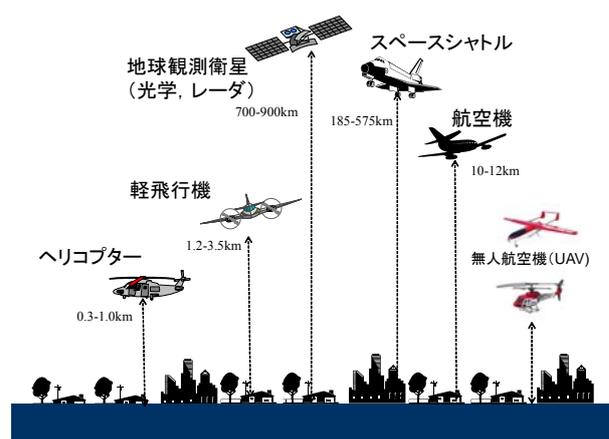


図1 リモートセンシングに用いるプラットフォーム

## 3. 衛星光学センサの利用

防災利用目的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, など)と、同1m程度以下の高解像度衛星(QuickBird, Ikonos, WorldView-2 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)と近赤外バンドを有している。これらの衛星に得られる画像は、大規模な災害が発生した直後より、次々とウェブ上でも公開され、被災状況の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、光学画像の撮影はほぼ午前に限定され、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。

近年、各国の宇宙機関は、大災害時の衛星画像の提供に関する協定「国際災害チャータ」を締結し、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。日本の衛星は、これまで国際災害チャータの枠組みで数多くのデータ提供を行ってきた。しかし東日本大震災では、内閣府が初めてチャータの発動を依頼し、各国の宇宙機関を通して、JAXA が衛星データの提供を受けることになった。この枠組みで、アメリカ、ドイツ、フランス、インド、中国、韓国 が、3月12日から4月14日までの期間、光学衛星画像データを提供した。なかでも、ドイツの RapidEye 衛星は毎日観測が可能のため、広域の状況把握に利用された。また、アメリカなどの高分解能衛星も、詳細な被害状況の把握に利用された。

国際チャータのアジア版ともいえるのが、2006年に発足したセンチネル・アジアである。同地域の自然災害の監視を目的としており、衛星から得た災害情報をインターネット上で共有し、災害を軽減・予防することを目的としている。このセンチネル・アジアの枠組みを通じて、タイ、台湾、インドの光学センサ衛星が、東日本大震災の発生時に画像を提供した。

洪水や津波による浸水域、それに大規模な斜面崩壊など、被害が広い範囲に及ぶ災害は、中解像度の光学センサ衛星で把握するのに適している。1つの例として2011年の秋にタイ中部のチャオプラヤ川流域を襲った大洪水の事例を紹介しよう。モンスーンから続い

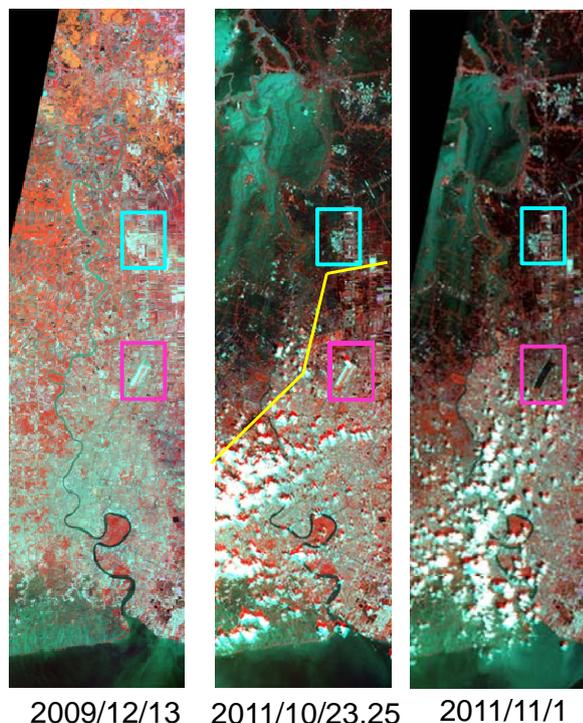


図2 タイ中部の洪水前後3時期の ASTER 画像

た長雨によって、川の水位は徐々に上昇し、洪水はタイの国土の9%を浸水させる大規模なものとなった。洪水は世界遺産の古都アユタヤや首都バンコクの北方の工業団地も次々と水に沈め、11月初旬にはバンコク中心市街地の北部にまで達した。図2はアユタヤから下流のバンコクまでを含む ASTER 画像である<sup>2)</sup>。黒く見えるのは洪水で冠水した地域であり、下方に白く見えるのは雲である。2011年10月からこの地域に浸水が始まり、図中の四角(上)で囲ったナワナコーン工業団地は地上2m程度の高さまで浸水し、日系企業を含むすべての工場が水没した。また、主として国内線で使用されているドンムアン空港も図中で四角(下)で囲っているが、10月25日時点では空港北部が冠水し始め、11月1日時点では滑走路が完全に水没した様子を観察できる。このように光学画像は、誰でも簡単に目視による判読が可能であるが、気象条件の制約を受けるのが大きな欠点といえる。

近年、進歩が目覚ましいのが高解像度の光学センサ衛星である。現在、最も解像度が高いセンサは、50cm-1m程度であり、建物1棟1棟はおろか、車やバイク、場合によっては人の存在が識別できることもある。東日本大震災の時の福島第一原子力発電所は、巨大津波に襲われて1-3号機が外部電源を喪失し、3月11日以降、危機的な状態が継続し、周辺の空域も飛行禁止となった。このため、国土地理院による被災地の航空写真撮影も、原発周辺の空域に関しては不可能となり、浸水範囲概況図の作成にあたって、高分解能衛星画像が使用された。図3は2011年3月14日午前11時4分頃に、米国の商業衛星から撮影された福島第一原子力発電所の様子であり、3号機建屋で水素爆発が起きたわずか3分後のものである。画像からは既に1号機建屋が爆発で吹き飛んでいる様子や、飛び散った瓦礫や津波浸水の痕跡なども確認できる。福島原発事故では、このような衛星画像が貴重な情報源となった。



図3 福島第一原子力発電所の3号機建屋爆発直後の様子 (DigitalGlobe ウェブサイト)

#### 4. 衛星熱赤外センサの利用

光学センサは、可視域や近赤外域における太陽光の地球表面での反射を観測する仕組みであるため(図4)、夜間においては観測が困難である。ここで地球表面は、太陽光を反射しているだけでなく、太陽光を吸収して暖かくなった熱エネルギーと火山活動などによる熱を熱赤外線として放射している。熱赤外センサは、この地表面からの放射輝度を観測する仕組みであり、表面温度が推定できる。放射を観測する仕組みは太陽光に依存しないため、昼夜関係なく地球表面の撮影が可能である。しかし、衛星熱赤外センサは、光学センサと比べると一般に空間分解能がかなり低いため、熱画像を用いた防災利用としては、森林火災や火山噴火など、高温かつ広範囲の被害状況の把握がこれまでは主であった。しかし、最近、夜間における衛星熱画像は、津波や洪水による湛水域の把握において有効であることが示されるようになった<sup>(3)</sup>。

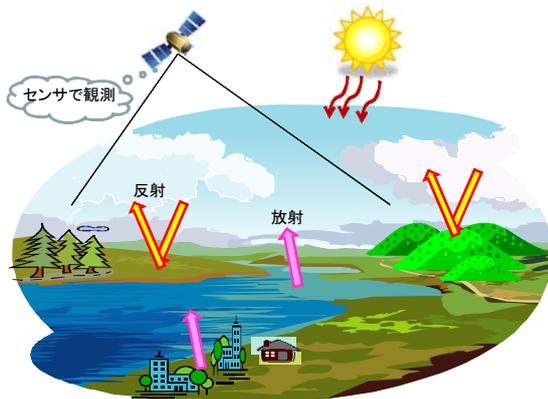


図4 衛星リモートセンシングによる観測の仕組み

筆者らは<sup>(4)</sup>、ASTER 熱赤外バンド画像(解像度 90m)を用いて、東日本大震災による津波湛水域の抽出を行った。福島県相馬市付近を夜間に撮影した熱赤外画像から求めた表面温度分布を用いて、津波前のほぼ同じ季節の表面温度と津波翌日のものの差分を取り、温度の変化域を図5のように抽出した。津波が襲った時期はまだ夜間の冷え込みが大きく、水面の方が陸地より夜間の表面温度が高い。そのため、夜間において表面温度が上昇した箇所は、津波による湛水が続いている範囲と見なせる。これらを ASTER による地震前後の昼間の光学センサ画像(解像度 15m)と比較した結果、概ね良好な湛水域の推定結果が得られていることを確認した。また、国土地理院が作成した浸水範囲概況図と比較した結果、ほとんどが浸水域内であることが確認でき、時間経過により湛水域が減少してはいるものの、良好な推定結果が得られたといえよう。

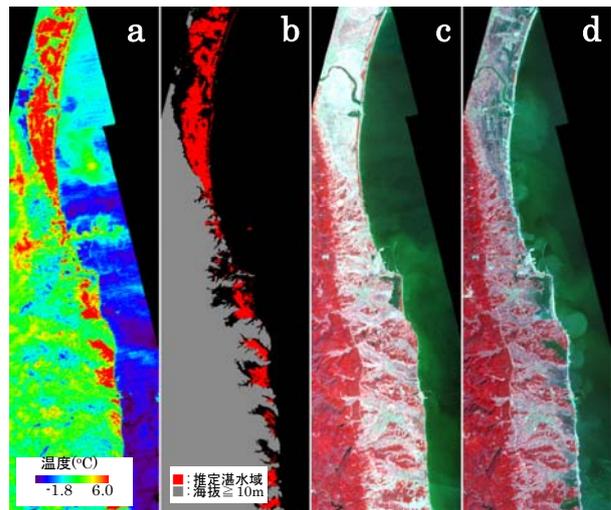


図5 ASTER 熱赤外画像による相馬市周辺の地震前後の推定表面温度の差分(a)、温度差分が+5°C以上の推定湛水域(b)、地震前(2009/4/7)の光学画像(c)、地震後(2011/3/19)の光学画像

同様に、2011年に発生したタイ中部のチャオプラヤ川流域の洪水においても、ASTERの熱画像によって光学センサ画像と同様の浸水範囲を把握することができた。衛星搭載の熱画像は、解像度の限界によってこのような100mオーダーの広がりのある地表面の変化把握への利用に限定されるが、航空機やUAVでより低空を飛行することによって、建物や道路などを対象とした、空撮熱画像による夜間の被害把握も可能になるものと考えている。

#### 5. 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、図6に示すように、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。SAR衛星としては、欧州宇宙機関(ESA)のENVISATやカナダ宇宙局のRADARSAT-1,2、それに日本のJAXAのPALSARなどが代表的なものである。PALSARセンサを搭載したALOS衛星(だいち)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た。また東日本大震災においても、地殻変動量の把握や、津波被害の把握に大いに貢献した。しかし、ALOSはPALSARに加えて光学センサも2つ搭載する多目的衛星で、震災発生後は昼夜兼行で観測を続けたため、2011年4月に残念ながら寿命を迎え観測機能が停止した。その後継機となるALOS-2(レーダ専用)は、2014年5月に打ち上げられ、キャリブレーションを終えて、実稼働が最近始まった。これらに加えて最近、商業用の高分解能レーダ衛星がドイ

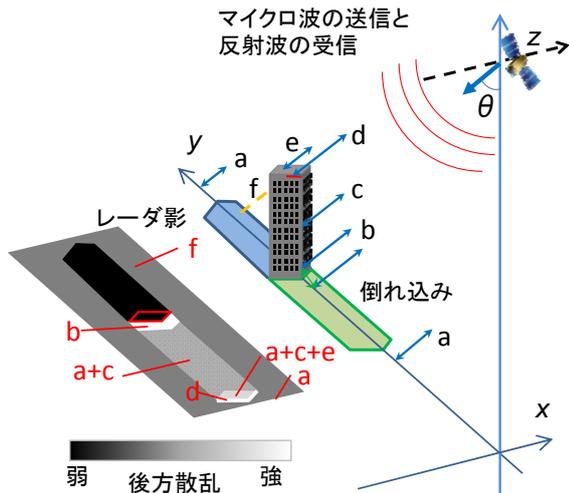


図6 合成開口レーダによる送受信観測の仕組み. 斜め照射によりレーダ影が生じ、建物は前方に倒れ込む。

ツとイタリアによって次々打ち上げられ、防災分野での利用が始まっている。

ここでは筆者らが最近行った地殻変動の抽出について少し紹介する。TerraSAR-X はドイツ航空宇宙センター(DLR)が 2007 年に打上げた高分解能レーダ衛星であり、日本が得意とする Lバンドより短い波長の Xバンドのマイクロ波を用いて観測を行っている。筆者らは、東日本大震災の前後に撮影された画像を、(株)パスコの主催する「SAR 技術応用研究会」を通じて提供を受け、これらを用いて地殻変動量を検出する方法を新たに提案した<sup>(6)</sup>。この方法では、地震後のレーダ画像が地殻変動により移動している可能性を考慮して、前後 2 画像間の位置合わせを行わず、衛星の軌道情報のみによって補正された画像を用いた。レーダの後方散乱(衛星方向への反射)が大きい無被害の堅ろう建物に関して、地震前後の SAR 強度画像(解像度約 3m)の空間相関を求めることで、この期間における建物の移動量を検出する。この方法を、国土地理院の GPS 電子基準点を含む SAR 画像に適用したところ、図 7 に示すように、基準点周辺の数百棟の無被害建物において GPS 観測値に大変よく近似した地殻変動量を得ることができた。また、この方法を東京の地震のない 2 時期のデータに適用したところ、ほぼ 0 の移動量となり、検出法が正しいことを証明することができた。今回の地震では、陸地において最大 5m を越える大きな地殻変動量が GPS 電子基準点の観測で得られているが、本提案手法によって、地殻変動量の詳細な面的分布を推定できると考えている。

高解像度 SAR データは、建物の被害把握にも用いることができる。高解像度光学センサ画像を用いた建物

の被害把握は、これまでに数多く行われてきたが、直下視の画像からは建物上面しか観察できないため、建物側面への被害や層崩壊などの被災パターンを判読することは困難で、被害を過小評価してしまう恐れがある。このような被害パターンの検出に関しては、ほぼ同時期にやや違う位置から撮影された 2 枚の光学画像の立体視により、建物高さを求めることも可能である。しかし、地震前と地震後で計 4 枚の画像が必要となり、地震前のデータセットが存在しない場合も多く、コスト的にも困難なことが多い。

東日本大震災では多数の建物が津波により大きな被害を受けたが、揺れによる被害とは異なり、図 8 のように建物側面や建物下部への被害が特徴的である。そこで筆者らは、SAR の斜め照射特性から起こる画像上における建物の倒れ込みを利用し、その範囲での後方散乱係数の地震前後の変化から建物側面の被害状況の把握を試みた<sup>(6)</sup>。図 9 は側壁が完全に損壊し骨組みだけとなった 2 階建て建物である。中段の SAR 画像でも判別できるが、倒れ込み範囲の後方散乱が低下している(暗くなっている)。これは壁の損壊によって、壁から

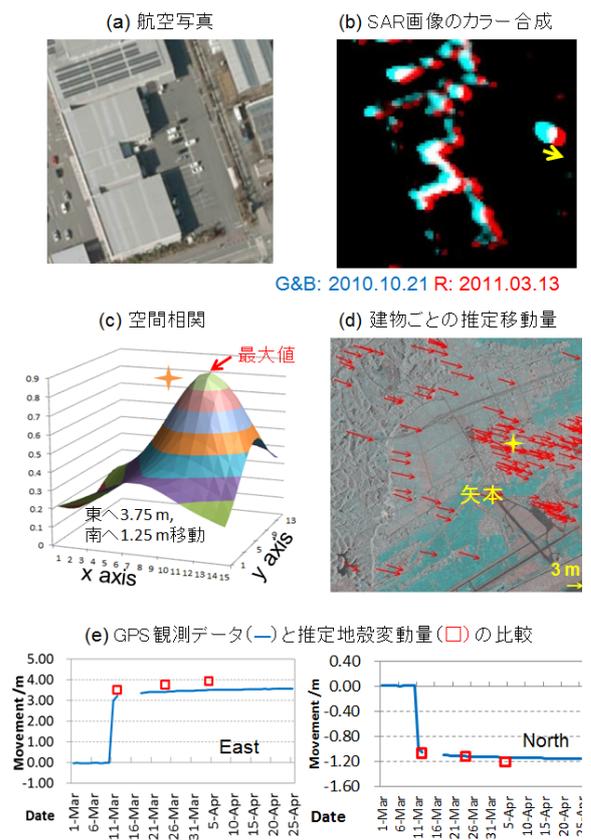


図7 SAR 強度画像に基づく地殻変動量の推定. 建物の航空写真(a), SAR 画像の 2 時期カラー合成(b), 最大相関となる建物移動量(c), GPS 矢本観測点付近の推定建物変位量(d), 建物の平均移動量と GPS 記録の比較(e)



図 8 東日本大震災で多数見られた津波による堅ろう建物の下部・側面の被害の様子（筆者撮影）

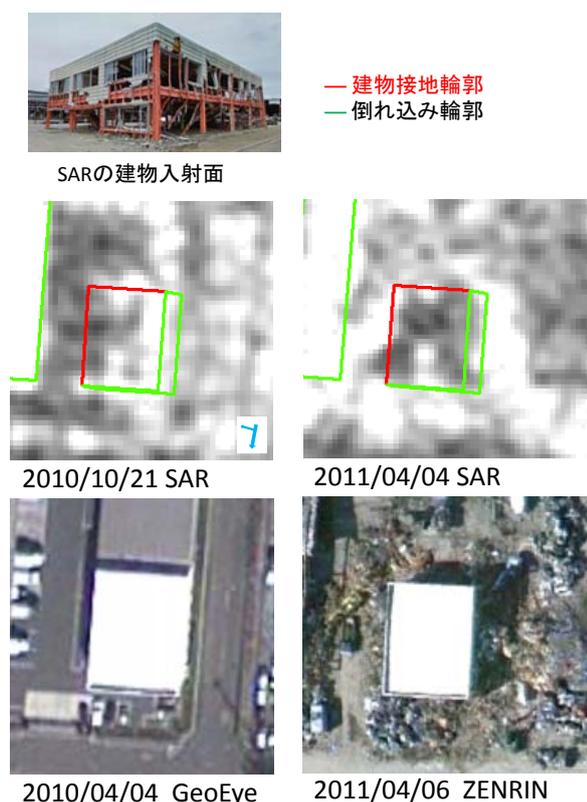


図 9 仙台塩釜港に立地する側面に被害を受けた建物の現地写真（上）、地震前後の SAR 強度画像（中）、Google Earth より抽出した光学画像（下）

の反射や地面と壁の二重反射が低減したためだと考えられる。

同様の手法を福島第一原子力発電所にも適用し、倒れ込み範囲とレーダ影範囲の後方散乱係数の平均値の変化を求め、爆発事故による原子炉建屋の損傷の把握を行った<sup>6)</sup>。その結果、倒れ込み範囲では配管や復旧機材等の影響で変化が出にくかったが、レーダ影の範囲の後方散乱係数の二時期差分を求めることで、爆発事故による建屋の損壊（レーダ影の縮小）を把握することができた。このように SAR 画像は、構造物の 3 次元的な形状・状況の変化を把握することにも利用できると期待される。

## 6. まとめ

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えよう。また衛星熱赤外センサも、夜間の広範囲の被害把握に利用可能である。マイクロ波を用いた合成開口レーダ（SAR）は能動的で昼夜を問わない全天候型のセンサで、高分解能化も目覚しく、災害把握を含む様々な分野で利用が拡大している。本文では、これらのリモートセンシング技術を用いた最近の災害による被害把握の事例について紹介した。

今後も、必ずや我が国を含む世界のどこかで大きな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いかにこれらの災害対応に有効に利用するかが、我々に課された大きな課題といえよう。

## 参考文献

- (1) 山崎文雄, リモートセンシングの防災利用の最新動向, 土木技術, Vol. 68, No.12, pp. 9-14, 2013.
- (2) 嶋影純, 山崎文雄, リュウ ウェン, 野中崇志, 笹川正, ASTER と TerraSAR-X 画像を用いた 2011 年タイ洪水における浸水域の把握, 第 55 回学術講演会論文集, 日本リモートセンシング学会, pp.101-104, 2013.
- (3) 外岡秀行: ASTER 夜間熱赤外面像に見る東日本大震災, 日本リモートセンシング学会誌 31(3), pp. 334-337, 2011.
- (4) 花田大輝, 山崎文雄: ASTER 熱赤外面像を用いた 2011 年東日本大震災における津波被害把握, 日本地震工学会論文集, 12(6), pp. 63-72, 2012.
- (5) リュウ・ウェン, 山崎文雄: 2011 年東北地方太平洋沖地震前後の TerraSAR-X 強度画像を用いた地殻変動の検出, 日本地震工学会論文集, 12(4), pp. 3-13, 2012.
- (6) 岩崎洋志, 山崎文雄, リュウ・ウェン, 野中崇志, 笹川正, 高解像度衛星 SAR 画像を用いた建物側面の被害把握, 日本地震工学会論文集, Vol. 13, No. 5, pp. 18-32, 2013.