

# リモートセンシングによる 広域災害の把握

やまざき ふみお  
山崎 文雄

千葉大学大学院工学研究科 教授

## 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、すでに長い歴史を有する。米国の陸域観測衛星のランドサットは、1972年に打ち上げられた1号から現在も稼働中の7号まで、40年間も地球表面の観測データを蓄積している。このような観測データの主な利用先は、従来は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限定されていた。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。

しかし、我が国では1995年の阪神・淡路大震災以降、様々なリモートセンシング技術が防災の分野で広く利用されるようになった<sup>1) - 3)</sup>。取得されたデータ利用の時間フェーズの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定されたものではなく、都市計画や環境保全分野でも同様の使い方が考えられる。もう1つのフェーズは、災害発生後に被害状況を把握するもので、自然災害のみならず、人為災害や環境破壊なども含めて、地表被覆状況の変化を観察するものである。

この2つのフェーズにおいて、リモートセンシング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あり、最近これらの空間分解能が大きく向上したことが、防災分野での利用が拡大した最大の要因といえよう。また、センサに対象地域へと

向きを変える機能が付加されたために、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)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による広域災害把握に関する最新の動向について、2011年東日本大震災における実例を中心に紹介し、今後の発展の方向と課題について考える。

## 2. リモートセンシングの特徴と防災利用に関する最新動向

### (1) リモートセンシングの特徴とプラットフォーム

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なども観測可能、といったことが挙げられる。

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が把握できる。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、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、レーダ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について見てみよう。図1に示すように、大気圏外のプラットフォームとしては、光学センサやレーダ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が挙げられる。大気圏内では、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を伴う空域に関しては、無人航空機 (UAV) の使用も考えられる。

## (2) 光学センサ衛星

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と、同 1 m 程度以下の高解像度衛星が主なものである。これらの多くは、可視光 3 バンドと近赤外バンドを有している。これらの衛星による画像は、大規模な災害が発生した直後より、次々とウェブ上でも画像が公開され、被災状況の把握に使われるようになった。特に、各国の宇宙機関が大災害時の衛星画像の提供に関して結んだ協定「国際災害チャータ」(International Charter-Space and Major Disasters)<sup>4)</sup> によって、当事国の緊急対応や国際支援活動にも利用されている。

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、光学画像の撮影は天候に左右され、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。

## (3) レーダ衛星

一方、合成開口レーダを用いたセンサは、マイク

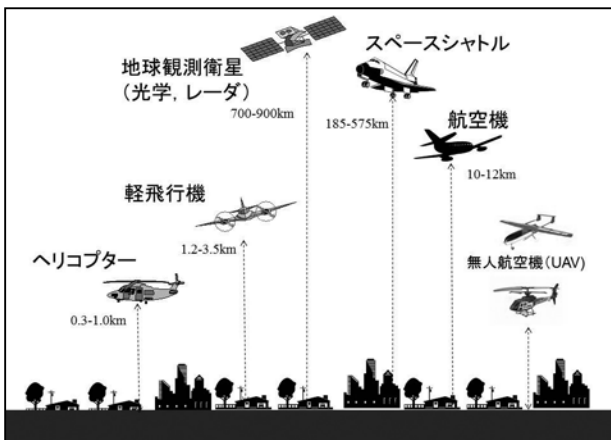


図1 防災リモートセンシングに利用される代表的なプラットフォーム

ロ波を能動的に放射してそ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。レーダ衛星としては、欧州宇宙機関の ENVISAT やカナダ宇宙局の RADARSAT-1,2、それに日本の宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の ALOS (日本名だいち) などが代表的なものである。

PALSAR センサを搭載した ALOS 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が、2011 年 4 月に残念ながら寿命を迎えた<sup>5)</sup>。現在、その後継機となる ALOS-2 (レーダ) と ALOS-3 (光学) の開発が進められている段階である。また最近は、商業用の高分解能レーダ衛星がドイツとイタリアによって次々打ち上げられ、防災分野での利用も始まっている。

## (4) デジタル航空カメラ

航空機などからの航空写真は、その解像度の高さゆえ、従来から写真測量や災害把握に用いられてきた。航空写真は、飛行高度 1,000~2,000m から撮影されるため、デジタル化した画像の解像度は、衛星画像をはるかに凌いでいる。最近では、従来のフィルムを用いるアナログ航空カメラに替わって、高性能のデジタル航空カメラが使われるようになった。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より、はるかに鮮明な画像が得られる。また、夕刻等の薄暗い時間でも空撮画像を取得でき<sup>6)</sup>、緊急撮影に適している。さらに、可視バンドに加えて近赤外バンドを有し、植生や水面の抽出に極めて有効である。デジタル航空カメラからは、通常 10~20cm 程度の高い解像度の画像が得られる。

## 3. 国土地理院による東日本大震災の被災地の緊急航空写真撮影とその活用

2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は、マグニチュード 9 という我が国では未曾有

の巨大地震であった。海底面の変動によって引き起こされた巨大な津波が、東北地方から関東地方の太平洋岸を繰り返し襲い、東日本大震災を引き起こした。

国土地理院では、地震発生の翌日から、被災地の航空写真の撮影を過去にない規模の体制で実施した<sup>7)</sup>。「災害時における緊急撮影に関する協定」に基づいて、主要な航空測量会社7社が地域を分担して、全てデジタル航空カメラにより計4千枚を超える撮影を行った。撮影範囲は、青森県から茨城県までの太平洋岸に沿った津波被災地域を面的にカバーするものであるが、原発事故の飛行制限区域は除かれた。

撮影された写真は、一刻も早く政府や被災地域の関係機関に届けるためデータ処理を進め、撮影日の翌日以降、国土地理院のサイトで順次公開された(図2)。さらに、撮影時の飛行位置・姿勢データと既存の数値標高モデル(DEM)を用いて、簡易オルソ(正射)画像を作成し、面的に連続した画像データを構成するとともに、これに地図情報を加えた正射写真地図も順次公開された。

さらに国土地理院では、撮影した航空写真を目視で判読して、津波浸水範囲を1/25,000地形図上に描き、10万分1浸水概況図も作成し(図3)、これらに基づいて浸水面積の総計を約561km<sup>2</sup>と推計

した。このうち原発事故による飛行禁止区域に対しては、高分解能光学センサ衛星画像の判読により浸水範囲が推定された。このほか、新旧の航空写真の比較による被災状況の可視化や、立体感のある斜め航空写真なども順次公開が行われた。

このような航空写真とその情報を加工して作成した被災状況マップは、国土地理院の東北地方測量部及び緊急災害対策派遣隊(TEC-FORCE)を通して、国や地方自治体および関係機関に、電子データや紙地図として千件を超える提供が行われた<sup>9)</sup>。

このほか、自治体による住家被害認定の調査方法として、内閣府は津波被災地域の第1次調査において、航空写真や衛星写真の利用を推奨した<sup>10)</sup>。すなわち、これらの画像から津波で流出したことが確認できた住家は、現地調査なしで全壊と判定されることになった。

同様の利用は、地震保険における損害の認定作業においても見られた。保険金支払いを迅速に行うために、航空写真・衛星写真を用いて被災地域の



図2 国土地理院による被災地域の航空写真のウェブページ(丸印をクリックすると写真が表示される)<sup>8)</sup>

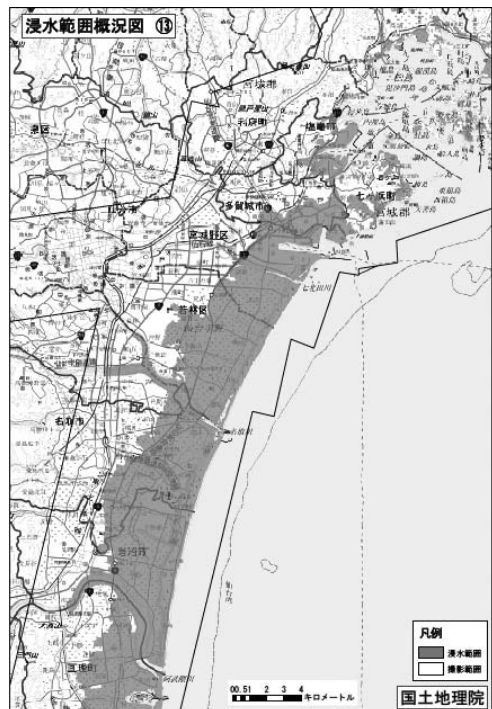


図3 国土地理院による津波浸水概況図の例(10万分1、仙台平野付近)<sup>8)</sup>

状況を確認し、津波や火災によって甚大な被害（流失や焼失）のあった街区を「全損地域」と認定し、当該街区に所在する地震保険契約はすべて「全損」と認定することにした<sup>11)</sup>。このように、今回の緊急撮影による情報は、災害対応に非常に多く利用されるとともに、今後の復興計画策定などにおいても、極めて重要な情報となると思われる。

#### 4. ALOS 衛星による被災地域の観測とデータ利用

ALOS は、2006年に JAXA によって打ち上げられた地球観測衛星である。ALOS には2つの光学センサと1つのレーダセンサが搭載されている。パンクロマチック（単バンド）立体視センサの PRISM（観測幅35m、解像度2.5m）と可視・近赤外センサの AVNIR-2（観測幅70km、解像度10m）によって光学画像を、またLバンド合成開口レーダの PALSAR によって、レーダ画像を取得することができる。ALOS は2011年4月22日に観測機能を停止したが、



図4 AVNIR-2による広範囲の津波浸水域の把握（左：地震後、右：地震前）<sup>5)</sup>

それまでの期間に多数の画像を取得した。

人工衛星からの観測は周回軌道条件に左右され、また、さらに光学センサの場合は天候に左右される。このため、AVNIR-2が東北地方から関東地方の太平洋沿岸を撮影できたのは、地震発生から3日後の2011年3月14日10時11分頃であった。仙台市から福島県相馬市付近までの範囲について、地震前後のAVNIR-2画像を図4に比較する。このように、衛星光学センサ画像は、広域を一度に俯瞰することができる利点を有し、同じ領域の災害前後の画像を並べて見比べることにより、災害による変化を容易に読み取ることができる。この例においても、仙台市から南の名取市、岩沼市、亶理町にかけて、海岸線から内陸に向かって5～6 kmの範囲が、津波で浸水したことが分かる。この図でも水面は暗く見えるが、近赤外バンドにおいて水面の分光反射率が小さい特性を利用すると、画像解析によっても容易に水域を特定することができ、洪水や津波による浸水域の把握に利用されている。

一方、レーダを用いるPALSARは、曇った日や夜間における観測も可能であり、軌道条件が合った2011年3月13日22時11分頃に宮城県中部から福島県の太平洋沿岸を撮影することができた。レーダの斜め入射による後方散乱は、陸地に比べて水面において小さい。したがって、津波によって浸水している範囲は、レーダの後方散乱強度画像によっても、明瞭に把握できる。また同じ条件で撮影されたレーダ強度画像を地震前後で比較することにより、津波や地震動による様々な変化や被害の抽出も可能である<sup>2)</sup>。

レーダデータのもう1つの利用法は、差分干渉解析による地殻変動量の抽出である。この方法では、地震前後に同じ条件で被災地域を撮影したデータの位相特性から、衛星と地表間の距離の変化を求める。図5はPALSAR画像の例と、地震前後のペアからJAXAが行った干渉解析結果である。遠方の地点と検討対象地点間の干渉縞の数を計算し、それにマイクロ波波長の1/2（11.8cm）を乗ずることにより、衛星と地表の間の距離変化が求められる。この図からは、地震による地殻変動が、東日本全

体に広がっている様子を読み取ることができる。

このように ALOS は光学センサとレーダセンサの両方を搭載している数少ない衛星であったため、地震発生直後より、昼夜を問わず被災地の画像を多数送り続けた。4月22日になって ALOS に異常が生じたのは、この時の無理が祟ったように思うのは、筆者だけではなからう。

この災害における JAXA から災害対応機関への衛星画像の解析・提供は約70種類に上る。解析結果の提供先の例としては、多数の中央省庁や宮城県、岩手県などが挙げられる。たとえば内閣官房には、仙台空港や福島第一原発の ALOS による地震前後の比較画像を提供するとともに、原発については、以下に述べる国際災害チャータによる高分解能衛星画像も提供した。また環境省からは、三陸沿岸の漂流物分布について要請があり、陸前高田市周辺のみで約56万 m<sup>2</sup>の漂流物を確認し情報提供した。その他の情報提供先に関しては、文献12) にまとめられている。

また中央省庁、地方自治体および関係機関向けに JAXA が行っている防災利用実証実験の「だいち防災 WEB」へは、発災から4月末までに1,500件のアクセスがあったという<sup>12)</sup>。

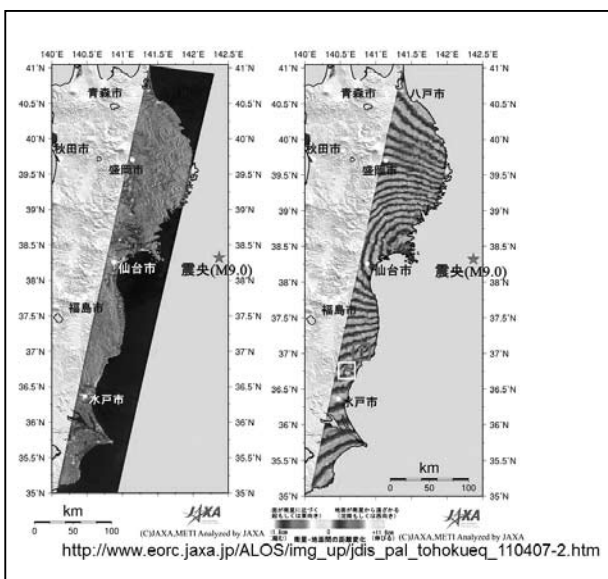


図5 PALSAR 画像の例(左)と2時期データの差分干渉解析で求めた干渉縞(右)<sup>5)</sup>

## 5. 国際的な衛星画像の提供活動

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。しかし今回の震災では、内閣府が初めて国際災害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<sup>12)</sup>。

この枠組みを通じて、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日の期間、光学センサによる衛星画像データを提供した。中でも、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。レーダ衛星に関しても、欧州宇宙機関、カナダ、ドイツの衛星が、3月12日以降、4月23日までの期間、取得した画像データを提供した。

このように国際災害チャータから提供されたシーン数は5千枚を超えるという。しかしながら、このような膨大な衛星データを処理・選別し、有効に利用する体制が我が国にできていたかどうかは疑問である。これまで、衛星による地球観測データは、研究機関などの利用にほぼ限られていた。今回は、実際の災害対応における利用が必要となった初めての機会であったといえよう。

国際災害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。アジア太平洋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、東日本大震災の画像を提供した<sup>12)</sup>。

図6はこの枠組みにより提供された台湾の Formosat-2衛星による画像である。この衛星は台湾とその周辺海域を準リアルタイムで観測する軌道で運行しているため、我が国の災害に対しても撮影機会が多い。この画像は3月12日9時15分頃と衛星の中で最も早く被災地域を観測したものとなった。このような地球観測分野の国際協力は、

我が国が今後、積極的に推進すべき方向と思われる。

## 6. 原発事故区域の衛星画像と無人機による空撮

福島第一原子力発電所は、巨大津波に襲われて1～3号機が電源喪失となり、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、国土地理院の航空写真撮影も原発周辺は不可能となり、浸水範囲概況図の作成にあたって、飛行禁止区域に関しては、高分解能衛星画像が使用された。

原発周辺地域の画像を撮影し、次々に世界的に公開したのは、米国の商業衛星会社である。2011年3月14日午前11時4分頃に、衛星軌道上から撮影された福島第一原子力発電所の様子は、3号機建屋で爆発が起きたわずか3分後に得られたものである。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。福島原発事故に関しては、このような衛星画像が次々にウェブ上で公開され貴重な情報源となった。

また、今回、原発地域が飛行禁止になった事態を受けて、政府の要請と東京電力の依頼により、民間の空撮会社エアフォトサービスが、3月20日と24日の両日、固定翼型無人航空機(UAV)を用いて空撮を行った。機体に取り付けられたカメラで、高度300～400mから垂直写真と斜め写真を約360枚撮影した<sup>13)</sup>。このような無人機による危険区域の空撮は、火山噴火などの災害時において、今後利用が広がるものと考えられる。

## 7. 高分解能レーダ衛星画像を用いた地殻変動と津波被害の抽出

ここまでの章では、東日本大震災において取得された衛星画像や航空写真について紹介し、その利活用に関して言及した。最後に、筆者らが行っている最近の研究について、少し紹介させていただく。

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る。この衛星は、日本が得意とするLバンド周波数より短いXバンド周波数を用いている。筆者らは、東日本大震災の前後に撮影されたTerraSAR-Xの地形補正したグランドレンジ画像を、(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考案した<sup>14)</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、軌道情報のみによって補正された画像位置情報を用いる。後方散乱が大きい無被害の建物に関して、地震前後の強度画像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電子基準点の「名取」と「矢本」を含むTSX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、この方法を地殻変動を含まない東京の2時期のデータに適用したところ、ほぼ0の移

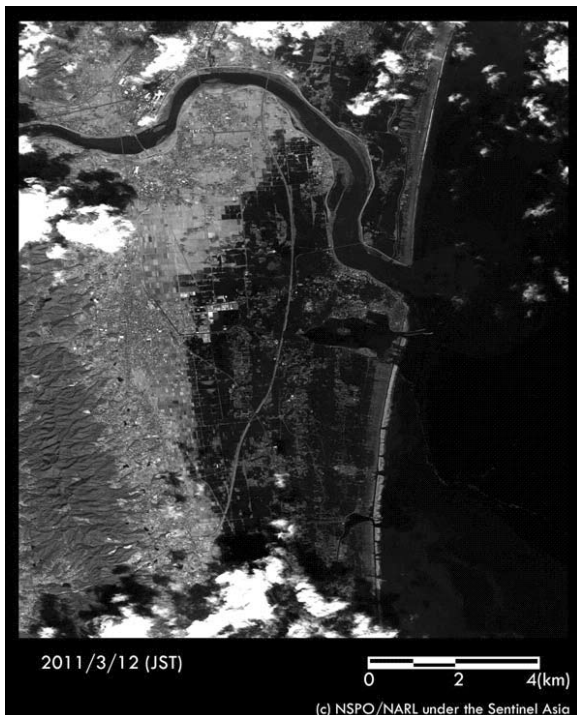


図6 台湾のFORMOSAT-2が観測した岩沼市、亶理町付近の冠水の様子<sup>5)</sup>

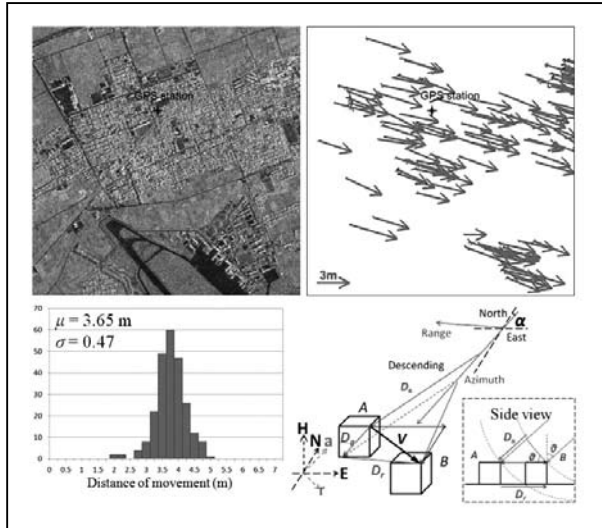


図7 矢本 GPS 電子基準点周辺で検出された高分解能レーダ衛星画像による無被害建物の移動量

動量となり、検出法の正しさ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5 mを超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<sup>8)</sup>、提案する手法によって、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。

## 8. まとめ

防災分野へのリモートセンシング技術の利用を念頭に、最近の新しいセンサやプラットフォームについて紹介した。人工衛星に搭載された光学センサや合成開口レーダに関しては、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。航空写真に関しては、デジタル航空カメラが普及し、高い輝度分解能や近赤外バンドを有する特徴が、新しい利用を広げている。

本文では、このようなりモートセンシング技術を用いて、東日本大震災に際してどのような画像が取得されたか、またそれらが災害対応においてどのように利活用されたかについて紹介した。今回の震災では、被災地域が広範囲にわたっており、原発事故による飛行禁止区域の設定もあって、航空写真に加えて衛星画像も、津波浸水域の把握や、

建物被災度の認定などにおいて広く利用された。また、国際災害チャータやセンチネル・アジアなどの衛星データ利用に関する国際協力プログラムも活発に行われた。

今後も、我が国を含む世界のどこかで、大きな自然災害が必ずや発生するであろう。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) 松岡昌志, 山崎文雄, 翠川三郎: 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. 648/I-54, pp. 177-185, 2001.
- 2) 松岡昌志, 山崎文雄: 1995年兵庫県南部地震での建物被害地域における人工衛星 SAR 強度画像の特徴, 日本建築学会構造系論文集, No. 546, 55-61, 2001.
- 3) 青木久, 松岡昌志, 山崎文雄: 空撮画像を用いた地震による被害建物の抽出, 写真測量とリモートセンシング, 日本写真測量学会, Vol. 40, No. 4, 27-36, 2001.
- 4) JAXA Web サイト:  
<http://www.eorc.jaxa.jp/charter/index.html>
- 5) JAXA/ALOS Web サイト:  
[http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/index\\_j.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/index_j.htm)
- 6) 減災総プロ Web サイト:  
<http://gensai.gsi.go.jp/committee/>
- 7) 政春尋志, 永山透: 東日本大震災への国土地理院の対応, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 50, No. 4, 179-185, 2011.
- 8) 国土地理院 Web サイト:  
[http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23\\_tohoku.html](http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html)
- 9) 国土地理院: 国土地理院東日本大震災調査報告会予稿集, 2011.
- 10) 内閣府防災情報のページ:  
<http://www.bousai.go.jp/hou/unyou.html>
- 11) 日本損害保険協会ニュースリリース:  
[http://www.sonpo.or.jp/news/release/2011/1103\\_07.html](http://www.sonpo.or.jp/news/release/2011/1103_07.html)
- 12) 高橋陪夫, 島田政信他: 東日本大震災における宇宙航空研究開発機構の取組み, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 50, No. 4, 198-205, 2011.
- 13) 山崎健吾: 東日本大震災における無人航空機による写真撮影の活動, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 50, No. 4, 216-218, 2011.
- 14) リュウ・ウェン, 山崎文雄: TerraSAR-X 強度画像を用いた東北地方太平洋沖地震における地殻変動の検出, 第51回学術講演会論文集, 日本リモートセンシング学会, 7-10, 2011.