

防災におけるリモートセンシング技術利用の最新動向

山崎 文雄

正会員 千葉大学 大学院工学研究科 建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail:yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

本稿ではリモートセンシング技術の防災分野への利用を念頭に、最近の新しいさまざまなセンサやプラットフォームについて紹介した。光学センサや合成開口レーダ(SAR)を搭載した衛星に関しては、高分解能化が大きな流れといえよう。また、SRTMや航空レーザースキャナによって取得された数値標高モデル(DEM)が地形分析や都市モデル構築に普及し始めた。従来からの広く使われている空中写真に関しても、デジタル航空カメラが普及し始め、高い輝度値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。これらの新技術に関する概要を紹介するとともに、最近の地震災害におけるこれらの適用例について解説する。

Key Words : remote sensing, disaster management, SAR, SRTM, Lidar, digital aerial camera

1. はじめに

リモートセンシングは、簡単にいえば「離れて観測する」こと一般を指す。しかし、より普通に使われる定義は、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ことが多い。その代表的なものが、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。代表的な陸域観測衛星としてLandsatシリーズがあり、1972年に打上げられた1号から現在も稼働中の7号まで、37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、衛星リモートセンシングによる地表面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年兵庫県南部地震(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¹⁾。取得されたデータ利用の時間フェーズとしては、1つは災害前の現況データを把握するもので、これはとくに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つは、災害発生後に被害状況を把握するもので、これは自然災害のみならず、人為災害や環境破壊なども含めて、ある種、急激な地表被覆状況の変化を把握するものである。

この2つのフェーズにおいて、リモートセンシングが防災分野で注目され、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、図-1に示すような光学センサ、熱赤外センサ、マイクロ波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、センサがターゲットに向きを変える(ポインティング)す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、防災分野の利用が広がった一因といえる。

本報告では、リモートセンシングの防災分野への利用に関する最新動向について実例をもとに紹介し、今後の発展動向と課題について考える。

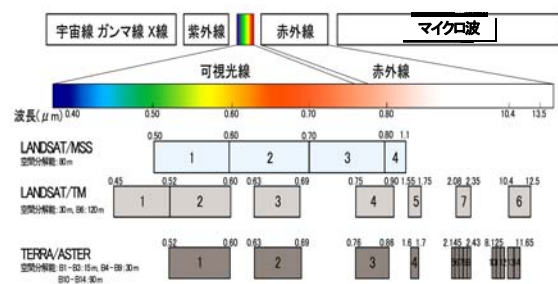


図-1 電磁波の波長と光学衛星センサの観測波長帯 (山口他⁸⁾)

2. リモートセンシングの特徴と防災分野への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

リモートセンシング、とくに人工衛星からの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により時間変化を把握できる、3)直接現地に行かずとも状況の把握が可能、4)人間の目で確認できない近赤外やマイクロ波なども観測可能、などが挙げられる。

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、たとえば関東平野位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、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の全天候利用や近赤外バンド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-2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、ビデオカメラ、マルチスペクトル・スキャナ(MSS)、レーザースキャナ(Lidar)、航空機SARなどがセンサとして搭載される。

(2) 光学センサ衛星

現在稼働中の地球観測目的の光学センサ衛星としては、Landsat-7, SPOT-5, Terra/ASTER, ALOS/AVNIR-2などがあり、地上分解能10-30m程度で中解像度衛星に分類できる。これらに加えて、最近では商業用の高解像度衛星も稼働している。代表的なものとして、Ikonos(解像度1m, 1999-)と

Remote Sensing

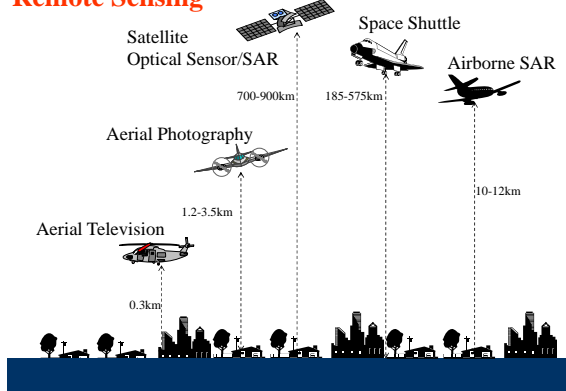


図-2 防災リモートセンシングに利用される代表的なプラットフォーム¹⁾

QuickBird(解像度0.6m, 2001-)が挙げられるが、これらの後継機となるGeoEye-1やWorldView-1なども最近、軌道に乗った。これらの多くは、可視域3バンド(BGR)と近赤外(NIR)バンドのマルチスペクトル(MS)計4バンドと、パンクロマチック(Pan)バンドを有している(図-3)。

QuickBirdについていえば、約0.6m解像度のPan画像と、約2.4m解像度のMS画像を組み合わせること(パンシャープン)で、約0.6m解像度のマルチスペクトル4バンド画像を作成することができる。また本来目指したものではないが、QuickBirdやIkonosのPanとMSのセンサの撮影時間に微小の時間差があり(QuickBirdで約0.2秒)、この時間差を利用して、航空機や車などの移動物体の速度検出に関する研究も行われている⁹⁾¹⁰⁾。

これらの衛星による画像は、大規模な自然災害が発生した直後より、次々とWeb上でもブラウザ画像が公開され、アクセスが困難な地域の被災状況の把握などに使われるようになった。とくに、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“International Charter-Space and Major Disasters”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始めた¹¹⁾¹²⁾。

光学センサ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、光学センサ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。

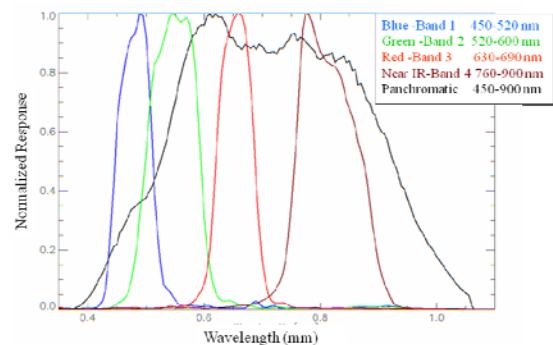


図-3 QuickBirdの各バンドの標準化スペクトル応答
(<http://www.digitalglobe.com>)

(3) SAR衛星

一方、合成開口レーダー(SAR)を用いたセンサは、マイク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(図-4)、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を搭載した人工衛星として、現在稼働中のものに、欧州宇宙機関(ESA)のEnvisatや日本の宇宙航空研究開発機構(JAXA)のALOS/PALSARなどがある¹²⁾¹⁴⁾。また最近では、商業用の高分解能SAR衛星であるTerrasar-Xも稼働を始め、防災分野での利用も始まっている¹⁵⁾。

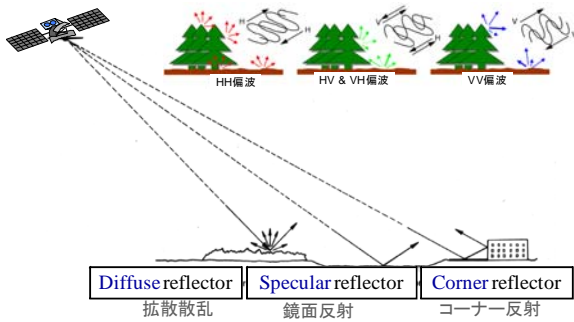


図-4 マイクロ波の送受信偏波と対象物での反射・散乱

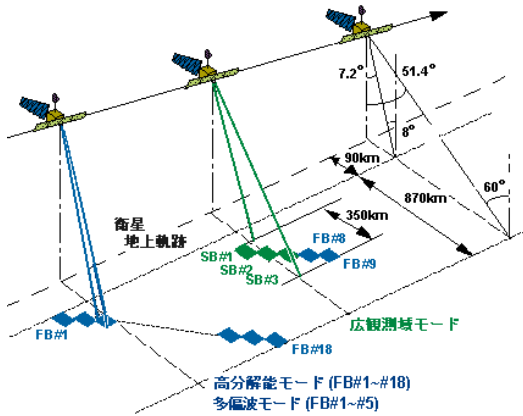


図-5 ALOS/PALSAR の観測モード¹⁴⁾

ALOS/PALSARは図-5に示すように、高分解能観測モードと、観測角を可変し250~350km(スキャン数に依存)という広い観測幅を有する広観測域モード(ScanSAR)を持っている¹⁴⁾。高分解能モードは、通常の観測モードであり、最高で地上分解能7mでの詳細な地域観測が可能となる。これはJERS-1/SARの約18mなどと比べて高い分解能である。HHまたはVVの単偏波による観測モード(FBS: Fine Resolution Mode, Single Polarization)と、HH+HV または VV+HV の2 偏波による観測モード(FBD: Fine Resolution Mode, Dual Polarization)の2種類がある。ScanSARモードでは、オフナディア角を変えることができる機能を用いて、約70kmの観測幅を3~5スキャン切り替えて送信し、250km(3スキャン)~350km(5スキャン)の広域を観測することができる。ただし、高分解能モードと比較すると地上分解能は低くなる。

ALOS/PALSARは、2006年5月27日に発生したジャワ島中部地震¹⁶⁾による地震被害を観測して以来、世界各地で発生した多数の地震、風水害、火山噴火などの災害状況を観測している。

(4) SRTM標高モデル

SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)¹⁷⁾は、NASAが中心に推進した地球表面の標高データを取得する事業で

ある。スペースシャトルに搭載された合成開口レーダ(SAR)を用いたリモートセンシング技術により、極圏を除く全球の陸地の数値標高モデル(DEM)が構築された。このデータは、3秒(90m)解像度のDEMとして、NASAのホームページ¹⁷⁾より、無料でダウンロードできる。このような全球のDEMは防災分野においては、標高による津波や洪水の浸水域の評価や¹⁸⁾、DEMより計算した斜面傾斜角などを用いた地形分類¹⁹⁾や斜面崩壊の発生率の評価²⁰⁾などに有効に利用できる。

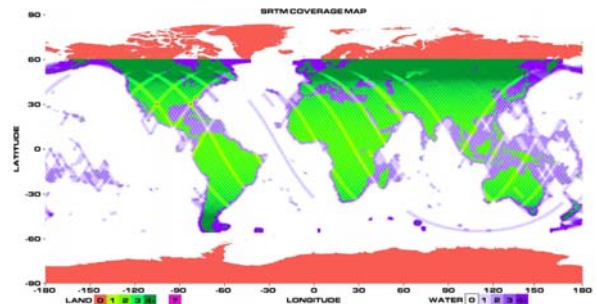


図-6 SRTM データの取得範囲¹⁷⁾ (数字は観測回数)

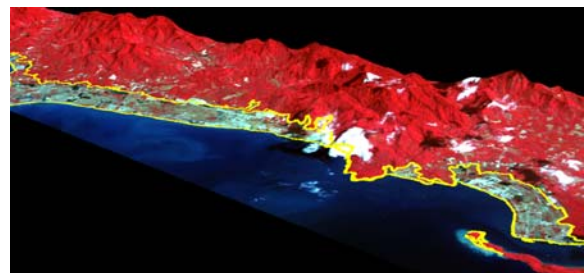


図-7 津波後のASTER画像(2004/12/31)をSRTM 90m DEMに重ね合わせた例¹⁸⁾。

(5) デジタル航空カメラ

空中からのリモートセンシングに関して、最近の動向を眺めてみよう。航空機などからの空中写真は、その空間解像度の高さから、従来から写真測量や自然災害による被害把握のために用いられてきた²¹⁾²²⁾。空中写真は、飛行高度1000~2000mから撮影されるため、スキャンし、デジタル化した画像の地上解像度は、衛星画像をはるかに凌いでいる。最近では、従来からのフィルムを用いるアナログ航空カメラに加えて、高性能のデジタル航空カメラが開発され、実際に使われるようになった。

デジタル航空カメラは、輝度値分解能が卓越しているため、同じ地上解像度の場合でも、アナログカメラで撮影されたものと比べると、より鮮明な画像を入手することができる²³⁾²⁵⁾。また、近赤外バンドを有するために植生の抽出に極めて便利である。また夕刻等の薄暗い時間になっても、感度が高いために、空撮画像を取得できる可能性が高く、緊急撮影にも適している。このような背

景より、現在、国土交通省総合技術開発プロジェクト「高度な画像処理による減災を目指した国土の監視技術の開発(平成19～21年度)」として、国土地理院や国土技術政策総合研究所を中心に研究開発が進められている。

現在、世界的に普及しつつあるデジタル航空カメラとして代表的なものに、Intergraph社(旧ZI Imaging)のDMC²⁶⁾(Digital Mapping Camera)とVexcel社のUltraCam-D²⁷⁾が挙げられ、わが国では航測会社や国土地理院にこれらのカメラが導入されている。これらのデジタル航空カメラの輝度分解能は12bit(4096階調)と高いため、非常に鮮明な画像が撮影できる。デジタル航空カメラは複数のカメラから構成されており、パンクロカメラから高解像度のPanバンド画像が、4つのマルチスペクトルカメラから可視域3バンド(BGR)と近赤外(NIR)バンドが得られる。また、これらを組み合わせてパンシャープン化することで、空間分解能10-20cm程度の4バンド画像が得られる。

地震後に得られたデジタル航空画像によって、建物倒壊²⁴⁾や道路損壊²⁸⁾などの被害抽出が試みられている。また、近赤外バンドを利用した屋上緑化の抽出²⁹⁾や、正確なGPS時刻と大きなオーバーラップ撮影機能を利用した車両速度の検出(図-9)など³⁰⁾など、広く都市環境問題に広く使われる可能性がある。

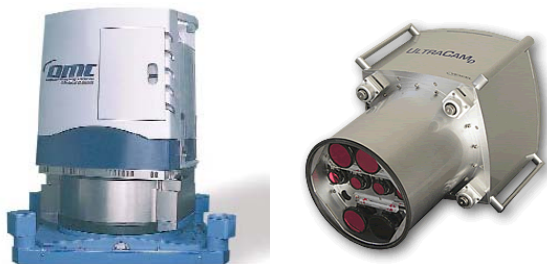


図-8 デジタル航空カメラ DMC (左) と UltraCam-D (右)



図-9 連続撮影したデジタル航空画像による車両速度抽出³⁰⁾

(6) 航空レーザースキャナ

空中からのリモートセンシング技術でもう1つ最近の重要なものが、航空レーザー計測(Lidar)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、レーザー光セン

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時間を計測して対地距離を求め、これらからレーザー光のフットプリント(地上測点)の位置情報(緯度、経度、標高)をデジタルデータで取得するものである(図-10)。

この航空レーザースキャナによって取得されたデータを空間補間して作成した地表面モデルは、DSM(Digital Surface Model: 数値表面モデル)と呼ばれ、建物等を含む全ての地表面の位置情報デジタルデータである。一方、DSMから建物等の構造物を除去(フィルタリング)した地形モデルをDEM(Digital Elevation Model: 数値標高モデル)、またはDTM(Digital Terrain Model: 数値地形モデル)と呼ぶ。国土地理院が作成し、日本地図センターから販売されている「数値地図5mメッシュ(標高)」はこのDEMであり、このような数値標高モデルは、とくに洪水による浸水域予測などに極めて有効である。また、フィルタリングの過程で3次元建物モデルを構築することが可能である。図-11はそのような手順で構築された3次元都市データMAPCUBE³¹⁾を用いて、その上に航空画像や建物側面写真を貼り合わせて構築した3次元都市モデルの例である³²⁾。このような可視化技術は、都市計画や景観評価のみならず、都市防災などにおいても有効なものと考えられる。

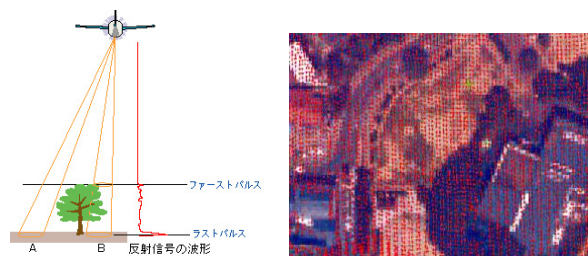


図-10 航空レーザー測定の概念と観測で得られるフットプリント(国土地理院 HP)



図-11 3次元都市モデル MAPCUBE に航空画像や建物側面写真を貼り合わせて構築した千葉大学西千葉キャンパス³²⁾

3. ALOS/AVNIR-2画像を用いた2008年岩手・宮城内陸地震の斜面崩壊の抽出

2008年6月14日に岩手県と宮城県の県境付近で、M7.2の内陸地震が発生した。震源近傍では多くの斜面崩壊が発生し、河道閉塞や道路の寸断が生じた。本章では、地震前後のALOS/AVNIR-2画像を用いて、正規化植生指標(NDVI)の変化により、斜面崩壊の検出を行う。使用したのは図-12に示す大崩落があった荒砥沢ダムを中心とした宮城県栗原市近辺のAVNIR-2画像(解像度:10m)で、地震前画像は2006年10月17日に、地震後の画像は2008年7月2日に撮影されたものである。荒砥沢ダム周辺を拡大した画像と正規化植生指標(NDVI)の画像を図-13に地震前後で比較する。

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (1)$$

ここで、Rは可視赤色バンド、NIRは近赤外バンドのDN値を表している。NDVIは植生の活性度を表す標準的な指標で、1.0に近いほど植生が強いことを示す。

この図より、大崩落の箇所では植生が裸地に変わるため、NDVIが大きく低下する様子が読み取れる。しかし、

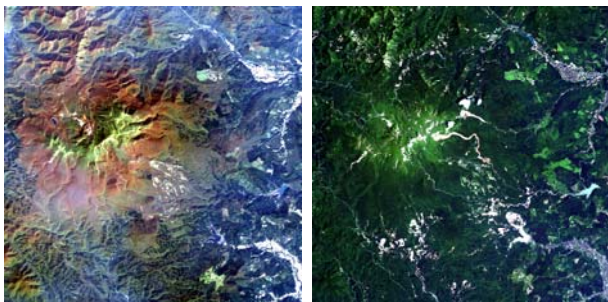


図-12 荒砥沢ダム周辺の地震前(左)と地震後(右)のAVNIR-2画像

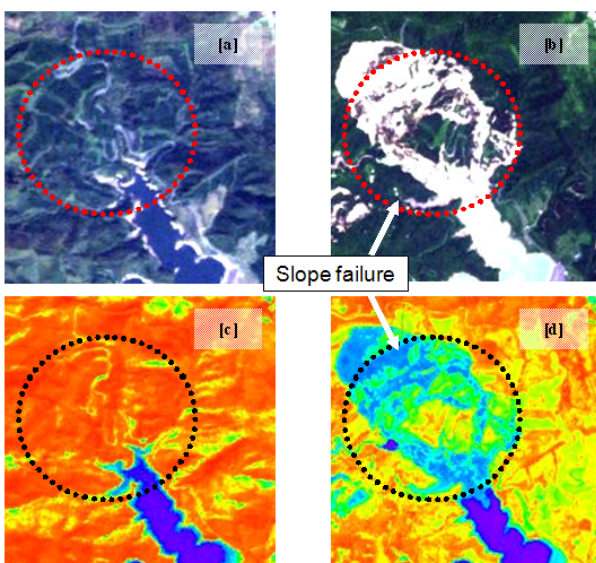


図-13 荒砥沢ダム上流の斜面崩壊箇所の地震前後画像(上)とNDVI分布(下)の比較。地震前(左)と地震後(右)。

地震前後の画像は撮影されたため季節が異なるために、季節変動による正規化植生指標(NDVI)の全体的な違いが見られる。そこで、地震による以外の変動の影響を除去するために、地震後のNDVIを補正する。NDVIを用いて各画像から植生の検出を行い、植生領域のNDVIの平均を算出し、全体的に高いNDVIを示す地震後画像から、地震前後のNDVIの平均差分を差し引く。その結果、図-14に示すように、補正した地震後画像のNDVI分布が、地震前のものに近づいている様子が分かる。

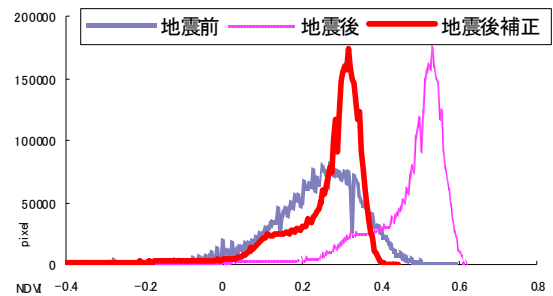


図-14 補正前後における植生領域のNDVIのヒストグラム

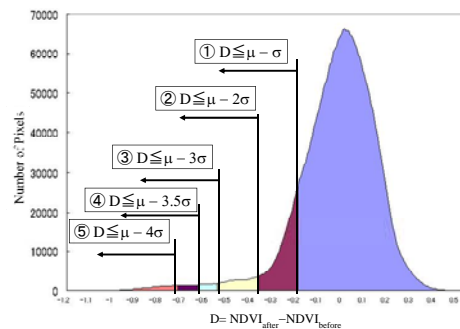


図-15 季節変動補正後におけるNDVI差分のヒストグラム

次に、位置合わせ後の地震前後画像について、NDVIの差分(以下D値)をピクセルごとに算出した。図-15にD値のヒストグラムを示すが、地震後に植生が減少した場合はこの値が負となる。この時NDVIの差分には、斜面崩壊による変動に加え、季節や撮影状況などの違いによる変動が混在するため、D値は正規分布に近い形状を示す。このために、ヒストグラムから植生が顕著に減少したことを示す閾値を設定することは困難である。そこで図中に示すように、ヒストグラムの平均値と標準偏差から閾値を設定し、目視で実際の画像と比較を行った結果、③で表される -3σ を超えた変動を最も適切な閾値として採用した。

このようなNDVIの差分に閾値を与えて決定した斜面崩壊の範囲を目視による判読結果と比較して図-16に示す。目視判読結果では斜面崩壊箇所は、図中全体で707カ所を確認ができた。目視判読の範囲に検出されたピクセルが存在すれば検出成功とした場合、NDVIによる検

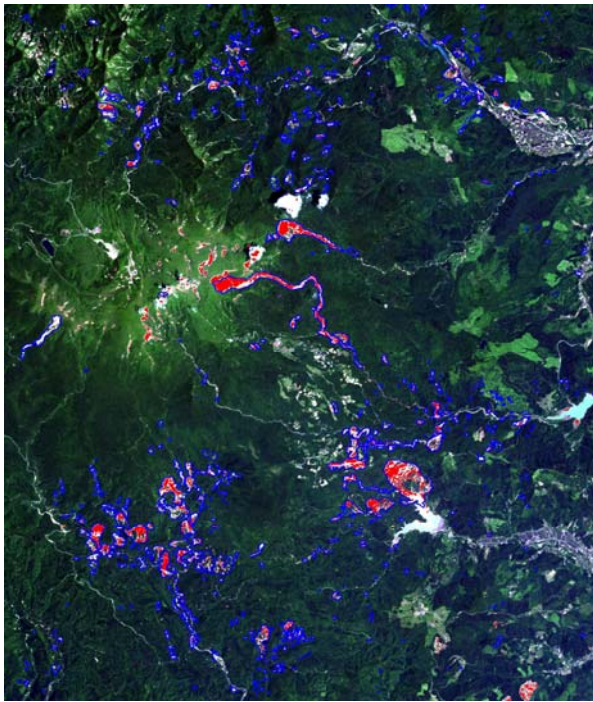


図-15 斜面崩壊のNDVIによる検出結果(赤)と目視判読結果(青)との重ね合わせ

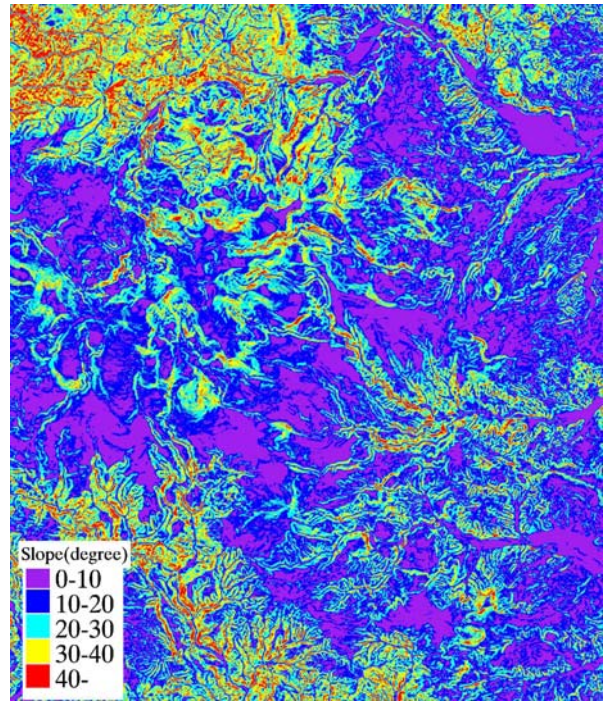


図-17 数値地図50mメッシュ(標高)より求めた傾斜度

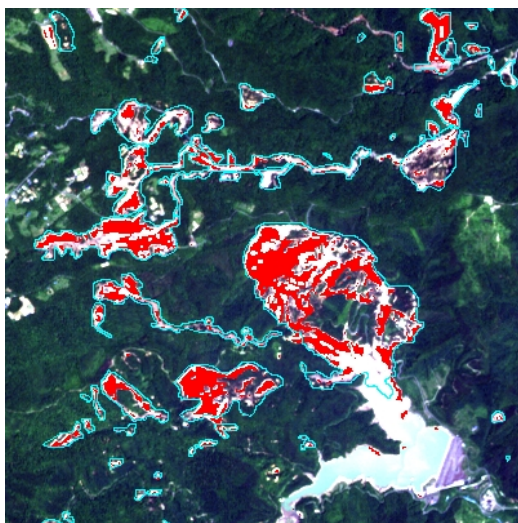


図-16 荒砥沢ダム付近の斜面崩壊の抽出結果の拡大比較
(赤：NDVI差による抽出，青：目視判読)

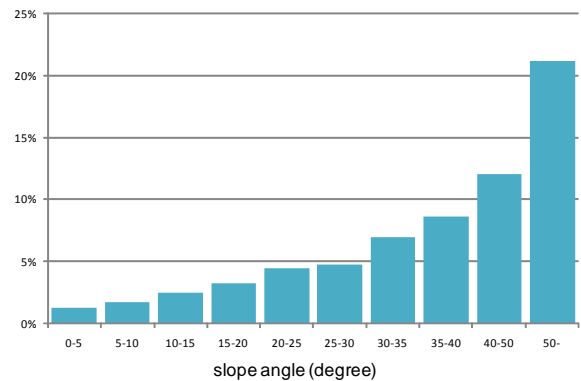


図-18 画像全体の傾斜度に対する斜面崩壊の傾斜度の割合

出結果では470カ所の検出に成功した。目視判読結果から推定した面積別の検出結果をみると、面積が500m² (AVNIR-2のピクセル5個の面積) を境に検出結果に大きく差が出た。500m² 以下の崩壊を検出できた割合は半分以下となったが、500m²以上の崩壊については、9割近く検出することができた。

NDVIの差を用いた斜面崩壊の抽出結果を見ると、斜面以外の平地においても多くのピクセルが抽出されていた。これは2時期における田畑の植生の変化や、水域の水量が異なり水辺の境界が変化したこと、水の濁り具合

の違いなどが考えられる。このような平地における変化を除去するために、DEM(数値標高モデル)を用いて平地部分の除去を行う。まず斜面崩壊箇所における傾斜度の特徴を調べた。国土地理院発行の「数値地図50mメッシュ(標高)」を使用し、ピクセルごとの傾斜度を算出した(図-17)。次に、算出された傾斜角と災害概況図(国土地理院作成)を参考に、作成した目視判読結果と重ね合わせ、傾斜度と斜面崩壊の関係を調べた。

各傾斜度帯における斜面崩壊が発生したピクセル数と画像全体の各傾斜度帯のピクセル数を求め、これらから各傾斜度帯における斜面崩壊の傾斜度の割合を計算した(図-18)。この図から、傾斜度が高くなるにつれ、斜面崩壊が発生する可能性が高くなることが読み取れる。斜面崩壊が発生している箇所を調べると、約97%が10度以上の傾斜を示す範囲であることがわかる。崩壊地の一部が

傾斜10度未満になるものは幾つか見られたが、斜面崩壊全体が傾斜10度未満となる箇所はなかった。平地における傾斜度は概ね10度未満であり、図からも傾斜10度以上を境に面積比が大きく異なる。また、過去の地震での崩壊事例でも、傾斜が15度以上になると斜面崩壊の発生件数が多くなり、30度から60度程度までのものが最も多く、10度未満のものはほとんどないことが指摘されている。そこで本研究では、傾斜度が10度未満の地域では、斜面崩壊による影響がほとんどないものとして解析対象から除去し、平地における誤抽出をフィルターした。このような操作によって、非常に精度よく斜面崩壊箇所を抽出することが可能となった。

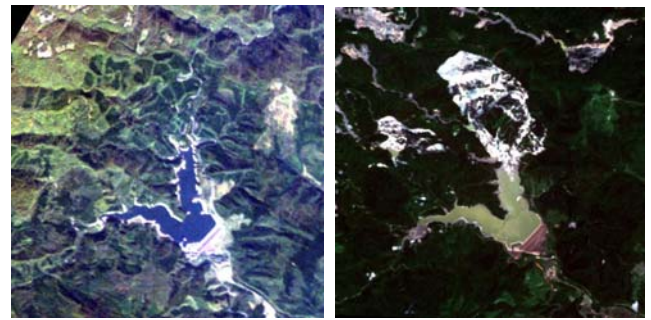
3. ALOS/PALSAR画像を用いた2008年岩手・宮城内陸地震による水域の変化抽出

SAR画像は、緊急性が重要とされる災害把握においても有効なものと考えられるが、その中でもその特徴を生かした洪水や津波による浸水域の抽出は重要である。SAR画像は、水面部分において反射強度が弱くなるという特性があり、これを生かすことでより正確な浸水域の推定が可能と考えられる。洪水や津波による浸水箇所は、時間が過ぎれば水が引いてしまうため、実際の浸水箇所の正確な判定が難しい。また、浸水している最中にその場所に立ち入ることは困難である。しかしSAR画像を用いることで、これを解決することが可能となる。

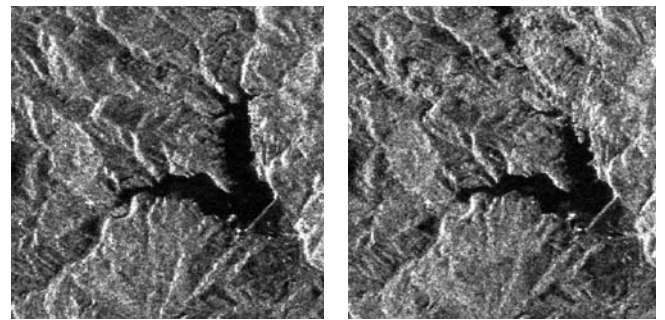
本研究では、災害前後に得られたPALSAR画像を用いて、水域の特性を把握しその自動抽出を試みる。浸水域の抽出には、2時期の強度画像を比較することで、浸水した場所を抽出することが可能となる。ただし、より正確な水域の変化抽出を検討できるように、今回は調査範囲を洪水被害地域ではなく、2008年6月14日岩手・宮城内陸地震により地形が変化したダム地域、および季節によって水域に変化する水田地域とした。SAR画像としてはPALSARによる2008年3月23日および2008年6月23日の岩手県南部、宮城県北部の内陸部を撮影した高分解能モード画像（HH偏波）を使用する(図-19)。また、水域の抽出や精度の評価等のために、ALOS/AVNIR-2画像も用いる。対象地域は地震前後のSAR画像および光学センサ画像の2種類が揃うため、これらを利用してPALSAR画像による水域の抽出精度を評価することができる。

抽出を行う前に、全ての画像でTriangulation法による位置合わせを行い、あらゆる場所が他の画像と重なるようにした。またスペックルノイズを除去するために、PALSAR画像に5x5のLeeフィルタを適用した。

水域抽出の対象地域は、図-19に示す①荒砥沢ダム周



AVNIR-2画像 a)2006年10月17日 b)2008年7月2日



PALSAR画像 a)2008年3月23日 b)2008年6月23日

図-19 荒砥沢ダム周辺の地震前後のALOS画像



②栗駒ダム周辺

③東成瀬地区



④前沢地区

⑤水沢地区

図-20 検討対象範囲のAVNIR-2画像(2008年6月23日)

辺に加えて、図-20に示す②栗駒ダム周辺、③東成瀬地区、④前沢地区、⑤水沢地区の計5箇所とした。①、②においては水域から陸域になった場所がある。①では岩手・宮城内陸地震において大規模な斜面崩壊が発生し、ダムの水域の一部が陸域に変わった。また②の栗駒ダムでは、地形の変化等は起こっていないが、地震後画像では土石流の流入を警戒して大きく水位を下げていたため、地震後画像では新たに露出した地表面が生じている。そ

のためこの2ヶ所に関しては、浸水場所ではなく逆に水が無くなった場所を抽出する。また、③、④、⑤では、地震前は水田の場所は乾いた状態であるが、地震後においては、水が張られていることがAVNIR-2画像から確認できるため、水域の変化抽出が可能であると考えられる。

次にこれらの対象地域の水域の後方散乱強度を調べた。AVNIR-2画像より目視で抽出した水域に対するPALSAR画像の後方散乱強度を図-21に示す。おおよそDN値が3,000以下に分布することがわかったが、水田地域では若干強度が高くなる傾向もみられた。全体では、後方散乱強度の90%累積値が2,460以下となり、また95%累積値が3,550以下となった。

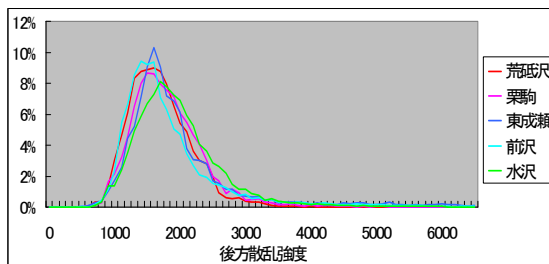


図-21 各対象範囲の水域における後方散乱強度

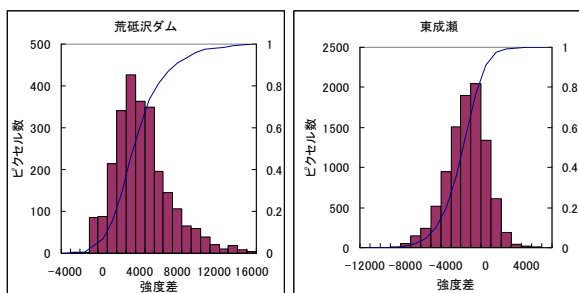


図-22 荒砥沢ダム湖に土砂が流入した範囲(左)と東成瀬の水田範囲(右)の前後画像の強度差分布

次に、浸水した領域および陸に変化した領域での後方散乱強度が、どの程度変化したかを調べた。各領域の地震前画像のDN値から地震後画像のそれを差し引き変化量を計算した。後方散乱強度の変化に関して、荒砥沢ダムと東成瀬地区を例として図-22に示す。田に水が張られた箇所においては、強度が低下する傾向が見られる。逆に、荒砥沢ダムに関しては水域が陸域へと変化したため強度が増加している。

水域および変化域の後方散乱強度分布から、変化域には特徴があると考え、2つの条件をともに満たす領域を変化域として抽出する。

条件A：水域を抽出するために、後方散乱強度が一定値以下のピクセル。

条件B：変化域を抽出するために、前後画像の強度変化が一定値以上のピクセル。

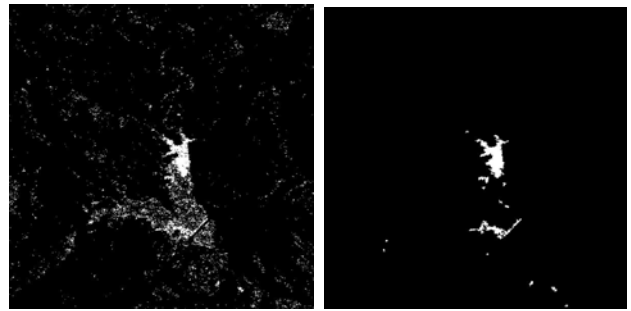
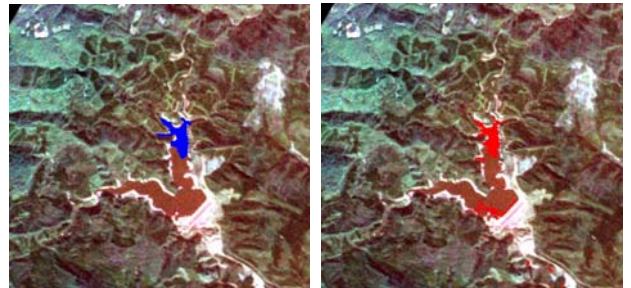
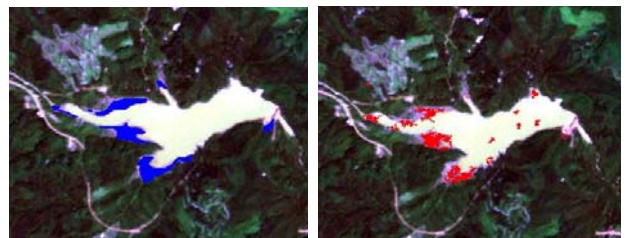


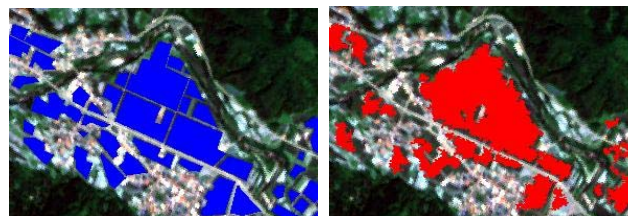
図-23 Open-close-scale フィルタの適用前(左)と適用後(右)の荒砥沢ダム周辺の水域が変化した領域



①荒砥沢ダム周辺



②栗駒ダム周辺



③東成瀬地区

図-24 陸地化した領域(①、②)と浸水域(③)の目視判読結果(左)と自動抽出結果(右)の比較

この2つの条件を満たすピクセルを抽出し、さらにノイズ等による微小領域の除去を行う。微小領域の除去にはOpen-Close-Scaleフィルタ³⁾を用いた。このフィルタは、図-23に示すように、微小領域に対してはOpening-Filterを施して消去し、ある程度の大きさを持った領域に対してはClosing-Filterを施して微小な孔を埋めることで、誤抽出を減らすことができる。

まず条件Aは全水域の90%以上を満たす浸水時の強度が2,300以上のピクセル、条件Bを同じく全体の90%を満たす330以上の変化域を抽出するように設定し、各対象範囲で抽出した(図-24)。抽出結果をAVNIR-2画像からの

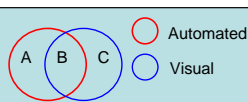
目視判読結果と照合したところ、ピクセル単位で全体では50%以上の精度の抽出ができた。とくに荒砥沢ダムでは、Producer 精度で60%以上の精度を得た。これは斜面崩壊によって地形が変わるとともに、水域が陸となったため、後方散乱強度が大きく増加したためと思われる。一方で水田の範囲では、それほど精度が高くなかった。これは稲が成長して水面の一部が隠れてしまったり、面積が小さい水域は、解像度の関係で畦道とミクセルとなったりしたと考えられる。また全体ではUser 精度は高く空振りは少ないが、Producer 精度が低く見逃された水域が多いことを示している(表-1)。

次に、抽出するための条件の設定を変えて、より高い精度の抽出ができるかどうかを調べた。抽出条件Aでは閾値を2000~3500に設定し、抽出条件Bでも閾値を1~2000でそれぞれ設定し解析を行った。この方法で比較的精度が高かった荒砥沢ダムに関する結果を検討する。抽出条件Aの閾値を下げるかBの閾値を上げる、つまり抽出条件を厳しくするにつれ、空振りが減ってUser 精度は上がるが、Producer 精度は下がり、見逃しが増えてしまう。次に2つの閾値の組み合わせを様々に変えた各ケースにおいて、User 精度とProducer 精度の平均を求め、荒砥沢ダムを例に図-25に示す。最も精度が良かったのはAの閾値を2500、Bを1500としたケースだった。ただしこの条件でも誤抽出に見える箇所があったが、地震直後の空中写真などと比較すると、浮遊する流木が取水塔付近に広がっており、これがマイクロ波に反射したため、強度差が生まれたともと思われる。

このように、災害発生前後の後方散乱強度の絶対値と変化量に閾値を設定することにより、水没した地域や逆に陸化した領域を精度よく抽出することができた。

表-1 各対象地域の精度

精度(%)	Producer	User
荒砥沢ダム	88.5	53.0
栗駒ダム	51.1	53.8
東成瀬	66.7	74.7
前沢	38.6	92.7
水沢	63.4	81.8



Automated (Red)

Visual (Blue)

Intersection: C

Producer 精度 = B/(B+C)

User 精度 = B/(A+B)

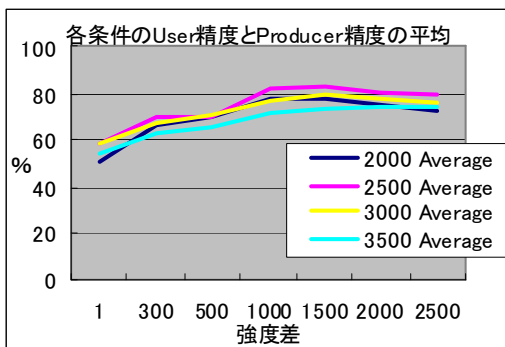


図-25 荒砥沢ダムにおける閾値と抽出精度の関係

4. デジタル航空画像を用いた2007年新潟県中越沖地震の瓦礫抽出

2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震において、柏崎市は最も大きな被害を受けた地域であり、死者14人、全壊家屋1,109件であった。デジタル航空画像を用いた地震被害把握の対象地域として、同市東本町の一部を選定した。東本町には中心市街地の商店街があり、そこから外れた住宅地には古い木造住宅が多く残っている。

使用したデジタル航空画像は、地震発生3日後の2007年7月19日に、アジア航測(株)によりデジタル航空カメラDMCを用いて撮影されたものである(地上解像度12.2cm)。また同日に国土地理院は、アナログ航空カメラRC30を使用して被害状況の空撮を行っている。同地域においては、柏崎市がデジタルカメラUltraCam-Dを用いて、地震発生3ヵ月前の2007年4月27日に航空画像を撮影している(地上解像度16.9cm)。同日に撮影されたデジタル画像とアナログ写真のスキャン画像を比較すると、デジタルカメラで撮影されたものがはるかに鮮明であり、エッジを計算すると明瞭さに大きな違いが見られる(図-26)。またデジタル画像は、近赤外バンドを有するため、フォーリスカラー画像の作成や正規化植生指標(NDVI)を計算することができる(図-27)。

これらのデジタル航空画像について、最尤法によるピクセルベースの教師付き分類をまず行った。教師付き分類による瓦礫抽出は、地震後画像のみしか入手できな

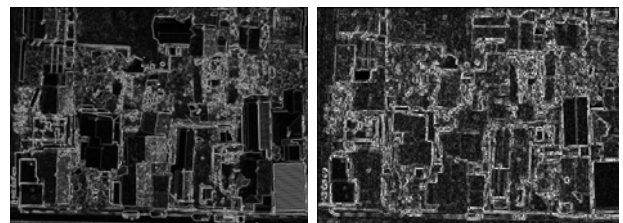


図-26 デジタル画像(左)とアナログ画像(右)に対する Prewitt フィルターによるエッジ抽出結果の比較

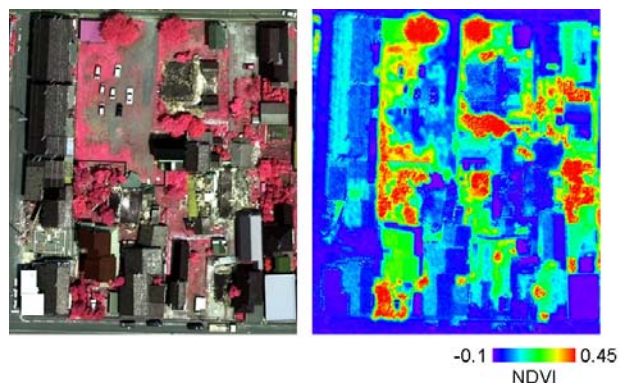


図-27 デジタル航空画像より求めたフォーリスカラー画像(左)とNDVI画像(右)

った場合を想定して、地震後に撮影された4バンド(RGB, NIR)のデジタル航空画像を8bitに変換したものを用いた。トレーニングデータとして、対象地域の画像に含まれるものを12種類選定した。その内訳は、無被害の建物の屋根をその色別に5種類(Black Roof, White Roof, Gray Roof, Red Roof, Blue Roof)、地面をアスファルト舗装(Road)とコンクリート舗装(Paved Ground)、裸地(Ground)の3種類、植生領域を木(Tree)と草地(Grass)の2種類、建物等の陰影部(Shadow)と抽出すべき瓦礫(Debris)となっている。トレーニングデータは、画像中からそれぞれ複数箇所選定した。

最尤法を適用した結果を図-28に示す。分類結果全体を見渡すと、概ね良好な結果を得られたように見える。使用した4バンドの中には近赤外バンドが含まれているため、TreeとGrassの誤分類は仕方ないとして、植生領域の分類は正確に行なうことができています。しかし、画像全体にごま塩ノイズ(Salt-and-Pepper Noise)が発生している。とくに、無被害建物の屋根や裸地、道路上に多く見られた。使用したデジタル画像が高解像度であるがゆえ、見え過ぎてしまうことがノイズ発生の一因となっている。太陽光の影響もノイズ発生要因のひとつとして考えられる。この画像は右方向から太陽光が当たっているため、建物の左側にできた影がShadowとして分類されている。また、同じ屋根の左側と右側で分類結果が異なっている。これは、太陽光の影響で屋根の左側部分がShadowのスペクトル特性に類似したことで発生した誤分類である。このような例は、分類結果の中に多数確認された。

次に、塩ノイズや誤分類を減らす目的で、オブジェクトベースの教師付き分類を行なうことにした。この方法では、まず画像全体をピクセル単位からオブジェクト単位に分割する。このセグメンテーションを行なうには、Scale Parameter, Shape Factor, Layer Weight, Smooth Weightという4つのパラメータを設定する必要がある。その中で最も重要といえるScale Parameterはオブジェクトの大きさを決定し、Shape Factorは、オブジェクトを生成する際にスペクトル特性と形状特性をそれぞれどの程度考慮するかを決定する。そして、Layer Weightで各バンドのスペクトル特性の割合を、Smooth Weightで形状特性を細かく決定していく³⁴⁾。セグメンテーション後のオブジェクトは、スペクトルや形状に関する特徴量を持つため、それらを分類の基準として用いることができる(図-29)。

オブジェクトに対して、さらに教師付きの分類を行った。ここでは、各バンドの輝度値の平均値に加えて、標準偏差や、瓦礫の複雑な形状を表現する特徴量も分類のための項目に加えた。最短距離法を用いた分類結果を図-30に示す。オブジェクトに画像分割を行なったため、ごま塩ノイズはもはや見られない。また、近赤外バンドを用いてセグメンテーションを行なったため、植生領域

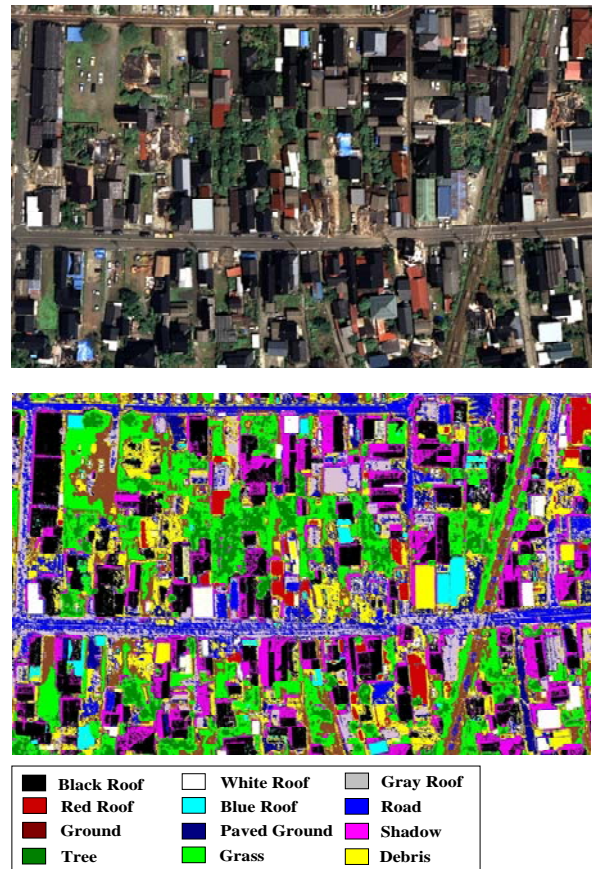


図-28 ピクセルベースの教師付き分類結果

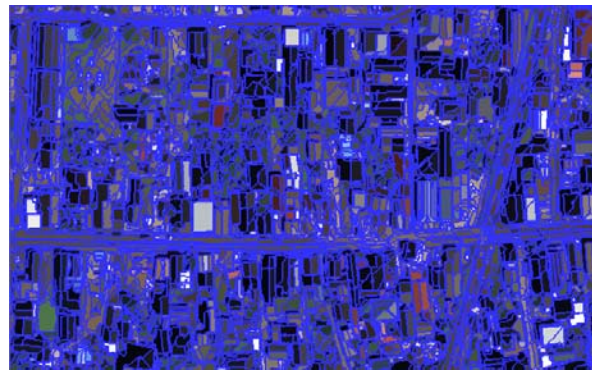


図-29 セグメンテーションの結果



図-30 オブジェクトベースの教師付き分類結果

は正確に分類も行なわれている。

しかし、今回行ったオブジェクトの教師付き分類の結果は必ずしも充分なものとはいえない。今回は、地震前のデジタル航空画像も撮られているが、瓦礫に注目した教師付き分類では、地震前に瓦礫が存在しないため、地震前画像を用いた精度の検討ができない。また、瓦礫はさまざまなものが入り混じっているため、多くの教師が必要であろうし、画像全体の土地被覆分類を行おうとすると、屋根の色彩による分類など、多数の分類が必要となり自動化が図りにくい。

これらのことを考えあわせると、別のやり方も考えられる。まず、画像レイヤーとして、4バンドに替えて白黒(パンクロ)とNDVIの2レイヤーを用い、瓦礫が固有の特徴を持たないと考えられる色彩の影響を除く。また、地震前後の画像をともにオルソ化し、数値地図に重ね合わせる。この作業により、地震前後の各2レイヤーを重ね合わせた4レイヤーとして扱い、瓦礫分類に関する教師付き分類や、レベルスライス法により瓦礫抽出を行う。超高解像度のデジタル航空画像を用いた建物被害の精度の高い抽出のため、このような方法も、現在、検討を重ねている。

5. 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、最近の新しいさまざまな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(SAR)に関しては、高分解能化やセンサのポインティングによる撮影機会の増大が大きな流れといえよう。また、SRTMや航空レーザーキャナによって取得された数値標高モデル(DEM)が地形分析や都市モデル構築に普及し始めた。空中写真に関しても、デジタル航空カメラが普及し始め、高い輝度値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。

これらの新技術に関する概要を紹介するとともに、最近の地震災害におけるこれらの適用例について解説した。ALOS/AVNIR-2画像を用いた2008年岩手・宮城内陸地震の被害抽出では、正規化植生指標(NDVI)の災害前後の変化とDEMの組み合わせにより、斜面崩壊を精度よく検出することができた。同地震前後のALOS/PALSARによるSAR画像からは、後方散乱強度の値と変動量により、水域の変化を正確に抽出することが可能であった。デジタル航空画像を用いた2007年新潟県中越沖地震の瓦礫抽出では、衛星画像を大幅に上回る高解像度のため、精度良い自動抽出結果を得るには、画像解析における新たな工夫が必要と考えられる。

このように、急速に進歩するリモートセンシングによ

り得られる空間データを、いかに被害軽減や災害対応に有効に利用するかが、現在大きな課題といえよう。

謝辞: 本研究で使用した柏崎市の地震後デジタル航空画像はアジア航測株式会社から提供頂いた。記して謝辞を表す。また、本文で紹介した解析事例は、千葉大学大学院生の加藤圭太君、鈴木大輔君と卒論生の石出貴大君が作成したものである。

参考文献

- 1) 山崎文雄, 松岡昌志, 小川直樹, 長谷川弘忠, 青木久: 上空および人工衛星からのリモートセンシング被害把握技術, 第10回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集, 75-80, 1998.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Yamazaki, F.: Applications of remote sensing and GIS for damage assessment: Freudenthal Lecture, *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Safety and Reliability*, CD-ROM, 12p, 2001.
- 6) 山崎文雄: 被害把握のためのテクノロジー開発, 地震防災のはなし, 岡田恒男・土岐憲三編, 朝倉書店, 162-173, 2006.
- 7) Yamazaki, F. and Matsuoka, M.: Remote Sensing Technologies in Post-Disaster Damage Assessment, *Journal of Earthquakes and Tsunamis*, World Scientific Publishing Co., Vol. 1, No. 3, 193-210, 2007.
- 8) 山口靖, 八木令子, 小田島高之監修: はじめてのリモートセンシング—地球観測衛星 ASTER で見る, ジオテクノス, 2004.
- 9) 恵多谷雅弘, 坂田俊文, 下田陽久, 松前義昭: 単一シーンの QuickBird データを用いた移動体検知の試み, 日本リモートセンシング学会誌, Vol. 24, 357-366, 2004.
- 10) Yamazaki, F., Liu, W., Vu, T.T.: Speed Detection for Moving Objects from Digital Aerial Camera and QuickBird Sensors, *5th International Workshop on Remote Sensing Applications to Natural Hazards*, Washington DC, USA, 6p, 2007.
- 11) 三浦弘之, 松岡昌志, 山崎文雄, 砂金伸治: 人工衛星リモートセンシングから見た 2006 年ジャワ島中部地震の被害, 第12回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM, Paper S2-3, 92-95, 2006.
- 12) 北原敏夫, 細川直史, 松岡昌志, 森山隆, 山崎文雄: 災害対応におけるリモートセンシング技術の活用, 予防時報, No. 232, 26-35, 2008.
- 13) 松岡昌志, 山崎文雄: ALOS/PALSAR による 2006 年 5 月ジャワ島中部地震の被害抽出, 第 41 回学術講演会論文集, 日本リモートセンシング学会, 47-48, 2006.
- 14) JAXA ホームページ: http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/index_j.htm
- 15) 三浦弘之, 翠川三郎: 2008 年岩手・宮城内陸地震での斜面崩壊地における高分解能 SAR 画像の特徴, 日本地震工学学会・大会—2008 梗概集, 344-345, 2008.
- 16) 松岡昌志, 山崎文雄: ALOS/PALSAR による 2006 年 5 月ジャワ島中部地震の被害抽出, 第 41 回学術講演会論文集, 日本リモートセンシング学会, 47-48, 2006.

- 17) NASA ホームページ : Shuttle Radar Topography Mission, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/index.html>
- 18) 山崎文雄, 胡内健一: ASTER 画像を用いたタイ南部の津波被害地域の検出, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM, Paper No. 367, 1574-1577, 2006.
- 19) 鄭炳表, 細川直史, 座間信作: リモートセンシングに基づく面的基盤データの抽出と地震被害想定への適用に関する研究—その 2 SRTM に基づく地形分類と地盤増幅度の推定—, 地域安全学会梗概集, No.16, 91-92, 2005.
- 20) リュウ・ウェン, 山崎文雄: ALOS-AV2 画像を用いた 2008 年中国四川地震における山間部の被害検出, 日本地震工学会・大会—2008 梗概集, 348-349, 2008.
- 21) Hamada, M., Isoyama, R. and Wakamatsu, K.: The 1995 Hyogoken-nanbu (Kobe) Earthquake, Liquefaction, Ground Displacement, and Soil Condition in Hanshin Area, 地震予知総合研究振興会, 1995.
- 22) 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, No. 2, 119-128, 2000.
- 23) 橘菊生: 小特集 デジタル航空カメラの最前線 第 5 章 ULTRACAMD, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 44, No. 5, 35-41, 2005.
- 24) Yamazaki, F., Suzuki, D., Maniyama, Y.: Use of Digital Aerial Images to Detect Damages due to Earthquakes, *14th World Conference on Earthquake Engineering*, CD-ROM, Paper No. 01-1049, 8p, 2008.
- 25) 鈴木大輔, 山崎文雄, 丸山喜久: デジタル航空画像を用いた 2007 年新潟県中越沖地震の建物被害抽出, 日本地震工学会・大会—2008 梗概集, 362-363, 2008.
- 26) Hinz, A.: The Z/I digital aerial camera system, *Proceedings of the 47th Photogrammetric Week 1999*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 109-115, 1999.
- 27) Leberl, F. and Gruber, M.: ULTRACAM-D: Understanding some Noteworthy Capabilities, *Photogrammetric Week 05*, Dieter Fritsch, Ed. Wichmann Verlag, Heidelberg 57-68, 2005.
- 28) 丸山喜久, 山崎文雄: デジタル航空写真を用いた新潟県中越地震時の高速道路被害抽出, 地域安全学会梗概集, No. 22, 11-14, 2008.
- 29) 関谷奈美, 山崎文雄: リモートセンシング画像と GIS データを用いた屋上緑化の自動抽出, 日本写真測量学会平成 20 年度年次学術講演会, 19-20, 2008.
- 30) リュウ・ウェン, 山崎文雄, T. Thuy Vu: 連続するデジタル航空写真を用いた車両の抽出と速度検出, 第 44 回学術講演会論文集, 日本リモートセンシング学会, pp.155-156, 2008.
- 31) MAPCUBE Homepage: <http://www.mapcube.jp/product/feature.html>
- 32) 加藤圭太, 山崎文雄: 3次元 GIS を用いたデジタルシティの作成と地震災害の可視化への応用, 地域安全学会梗概集, No.20, 85-88, 2007.
- 33) Vu T. T., Matsuoka M., and Yamazaki F., Detection and Animation of Damage Using Very High Resolution Satellite Image Following the 2003 Bam, Iran, Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol.21, No. S1, pp. S319-S327, 2005.
- 34) Baatz, M., Benz, U., et al.: e-Cognition Professional Users Guide 4.