



高解像度 SAR 画像を用いた東北地方太平洋沖地震における 津波湛水域と建物被害の抽出

リュウ・ウェン¹⁾、山崎文雄²⁾、郷右近英臣³⁾、越村俊一⁴⁾

- 1) 学生会員 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻・日本学術振興会特別研究員、修(工)
e-mail: wen_liu@graduate.chiba-u.jp
- 2) 正会員 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻、教授 工博
e-mail: fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp
- 3) 学生会員 東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター、修(工)
e-mail: gokon@tsunami2.civil.tohoku.ac.jp
- 4) 正会員 東北大学大学院工学研究科災害制御研究センター、准教授 博(工)
e-mail: koshimura@tsunami2.civil.tohoku.ac.jp

要約

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により引き起こされた巨大津波は、日本の太平洋沿岸地域を繰り返し襲い、甚大な被害を引き起こした。本研究では、地震前後に撮影された高解像度衛星TerraSAR-Xの強度画像を用いて、津波による湛水域と建物被害の抽出を行った。後方散乱係数が極めて低いという水域の特性を利用して、地震前後画像から平均差分が減少した地域を湛水域として抽出した。また、1棟単位の建物輪郭データを用いて、輪郭内における後方散乱係数の平均差分と平均相関を算出し、浸水域内における建物被害を抽出した。これらの結果を航空写真の目視判読の結果と比較し、精度を検証した。

キーワード： 合成開口レーダ、差分、相関係数、浸水域、建物被害

1. はじめに

2011年3月11日に三陸沖を震源としたMw9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。震源位置は北緯38.322°、東経142.369°、深さ約32 kmであった。この地震によって巨大津波が発生し、北海道から千葉県にかけて大津波が押し寄せ、海岸線から最大約6 kmの内陸まで遡上した。とくに岩手県・宮城県・福島県の3県では、沿岸の市街地、住宅地、村落が津波に襲われ、約2万人の死者・行方不明者が出た。国土地理院の調査によると、全国で約561 km²の範囲が津波によって浸水した¹⁾。地震と津波が原因となった建物損壊、火災、液状化、原子力発電所事故などにより、東日本全域が大きな影響を受けた。こういった広範囲の被害を把握するには、人工衛星や航空機からのリモートセンシング技術が有効である。光学センサは、誰でも分かる画像の形で地表の情報を提供できるが、雲など天候の影響をうけることが課題である。一方、合成開口レーダ(SAR)の単偏波画像では白黒で情報量に乏しいが、天候の影響を受けにくいかつ夜間でも撮影できるため、災害等の緊急対応に適する。また最近の空間分解能の向上も目覚ましく、地上解像度1~5mのTerraSAR-X(TSX)やCOSMO-SkyMed(CSM)が打ち上げられ、レーダ画像が

らも詳細な地表面の状況把握が可能となった。

SAR画像は水域における特徴が明瞭であるため、これまで頻繁に水害の検出に用いられてきた。Horritteら²⁾はトーンとテクスチャ情報を用いて、単一のSAR画像からスムーズな水域輪郭を検出する動的輪郭モデルを構築した。Ahtonenら³⁾とMatgenら⁴⁾はそのモデルを利用して、洪水の遡上域を検出した。また、Heremansら⁵⁾は多時期のENVISAT/ASAR画像から、後方散乱強度を用いた手法で浸水域の検出に成功した。Geudtnerら⁶⁾とDellepianら⁷⁾は、C-bandのSAR画像から干渉解析による洪水モニタリングを行った。日本国内でも、那珂川の水害を事例に冠水域の抽出⁸⁾などに関する研究が多数ある^{9),10)}。

SAR画像は地震による建物被害の検出にも用いられた。松岡・山崎¹¹⁾は1995年兵庫県南部地震の前後に観測されたERS/SAR強度画像と建物被害の詳細な現地調査結果に基づいて、後方散乱係数の変化と街区レベルの建物被害率の関係を調べ、被害の甚大な地域を検出する手法を提案した¹²⁾。また、1999年トルコ・コシヤエリ地震や2001年インド・グジャラート地震への適用性を検討した¹³⁾。位相情報を用いた干渉処理では、軽微な被害を含む建物被害地域も検出されている^{14),15)}。最近では、高解像度のSARと光学画像を組み合わせることで、1棟単位の建物被害検出も行われている^{16),17)}。

本研究では、地震前後に撮影された3時期のTSX画像を用いて、差分処理による2時期の湛水域の抽出を試みる。さらに、1棟単位の建物輪郭データを利用して、地震前後の画像から変化量を算出し、津波の被害を受けた建物を検出する手法を提案する。

2. 画像データと前処理

本研究では、津波による被害が大きかった仙台市を含む宮城県沿岸部を撮影した地震前後の3時期のTSX画像を用いた。地震前の画像は2010年10月21日に、地震後は2011年3月13日（地震後2日目）と3月24日に撮影されたものである。対象範囲と使用する画像を図1に示す。3枚の画像ともに下降軌道からHH偏波で観測された。観測角度は37.3°であり、StripMapモードで撮影された。解像度はアジマス方向が約3.5 m、レンジ方向が約3.3 mである。用いた画像は、幾何補正(EEC)後に1.25 m/pixelの解像度にリサンプリングされたものである。

画像の前処理として、放射輝度補正とノイズの除法を行った。放射輝度補正は、原画像のデジタルナンバー (DN) から、単位面積における放射輝度を表す係数(σ^0)に変換する処理である。補正後の3枚の画像の後方散乱係数は、いずれも-30 dBから30 dBの範囲であった。また、SAR画像には多くのスペckルノイズが含まれており、これを除去するためにEnhanced Leeフィルタ¹⁸⁾を用いた。詳細な地表情報を保持するために、最も小さい3×3ピクセルのウィンドウ幅を使用した。フィルタ後、スペckルノイズが減少し、よりスムーズな画像が得られた。

3月11日の本震及びその後続く余震により、東北地方を中心に広域で大きな地殻変動が発生した。国土地理院が全国に設置したGPS電子基準点の記録によると、本震直後に宮城県で東南東方向に約4 mの水平変位と約1 mの沈下が観測された¹⁾。対象エリア内にある名取電子基準点では、13日まで東南東へ3.18 mの水平移動と0.25 mの沈下が記録された。そのため、軌道情報のみから位置補正された地震前後のTSX画像を重ねると、地表物にズレが生じる。この結果より、リュウ・山崎は¹⁹⁾SAR強度画像から地殻変動を抽出する手法を提案している。

2010年10月21日の事前画像に青色(B)と緑色(G)を与え、2011年3月13日の事後画像に赤色(R)を与えて合成したカラー画像(図2(b))上に、図2(a)に示す建物の輪郭がシアン(B+G)から赤へ、約2ピクセルのズレが確認できる。このズレ量は、地震前後画像を用いた変化抽出の誤差になるため、前処理段階で除去する必要がある。地域によって地殻変動が異なるため、ズレ量も異なる。しかし、対象地域における地殻変動の差が最大0.3 mであるため、本研究では均一に地震画像全体を右(東)へ大体のズレ量となる2ピクセル移動した。移動後は、図2(c)に示すようにカラー合成図では地表物の輪郭がほぼ重なるようになった。対象地域がさらに大きい場合では、地域ごとに移動することが望ましい。

3. 津波による湛水域の抽出

前処理後、用いた3時期の画像をそれぞれBGRのバンドに入れ、合成したカラー図の一部を図3 (a)に

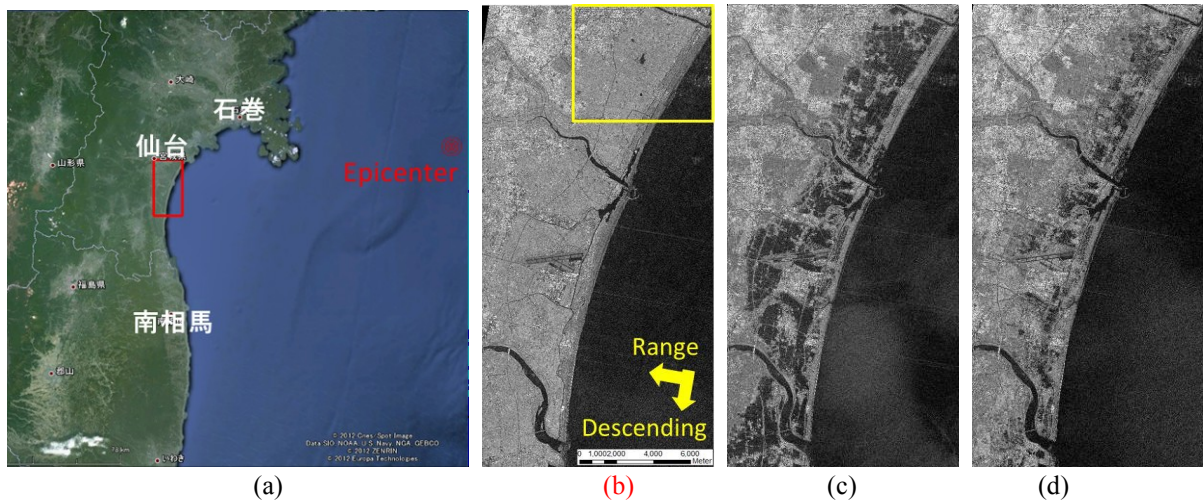


図1 Google Earthに表示した対象範囲となる東北地方沿岸地域(a), 2010年10月21日に撮影された地震前のTSX画像(b), 2011年3月13日(c)と24日(d)に撮影された地震後のTSX画像

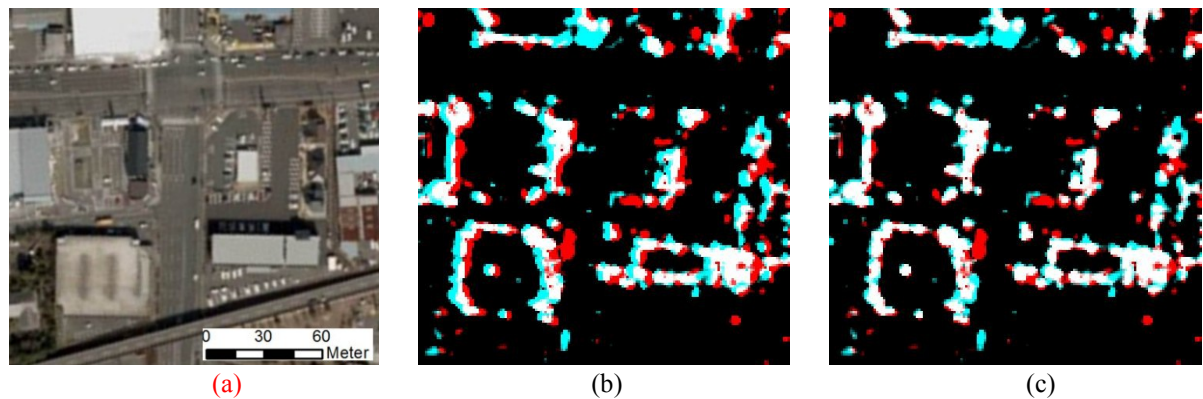


図2 Google Earthから切り出した地震後の光学画像(a), 2010年10月21日(G&B)と2011年3月13日(R)のオリジナル画像を用いて高い後方散乱係数の範囲のみを表示したカラー合成図(b), 地震前画像を東に2ピクセル移動後のカラー合成図(c)

示す。既往の研究から、水域は表面が平坦であるため、ほかの土地被覆より後方散乱係数が極めて低いという特徴がある¹⁰⁾。そのため、カラー合成図から津波により湛水した範囲が容易に確認できる。2011年3月13日の時点で湛水し、24日までに水が引いた範囲が紫色(R+B)、24日まで湛水し続けた範囲が青で表示された。この

沿岸地域では地形の起伏が少なく、津波が約4 kmの内陸まで遡上した。地震後は、地盤沈下の影響で湛水し続ける水田が多数見られる。

3.1 抽出手法

津波により湛水した地域を抽出するには、地震前後の画像を用いた差分処理が最もシンプルかつ有効である。地震後画像と地震前画像の後方散乱係数を差し引くことで、湛水域は後方散乱係数の減少により負の数値になる。しかし、地震前後の画像からピクセルごとに差分を求めると、小さい地表物に反応し、ノイズを多く含む結果になる。そこで、本研究では小さいウィンドウを用いた平均差分を計算することにした²⁰⁾。まず、ウィンドウ内における後方散乱係数の平均値を求める。2時期の画像から得られた平均値の差分をウィンドウ中心点における差分値とする。この手法は、地殻変動による残差などのノイズを減少し、より安定した結果が得られる。用いるウィンドウが、3×3ピクセルから15×15ピクセルまで7つの異なる大きさに設定した。ウィンドウが大きいほど、得られる差分図が過度の平滑

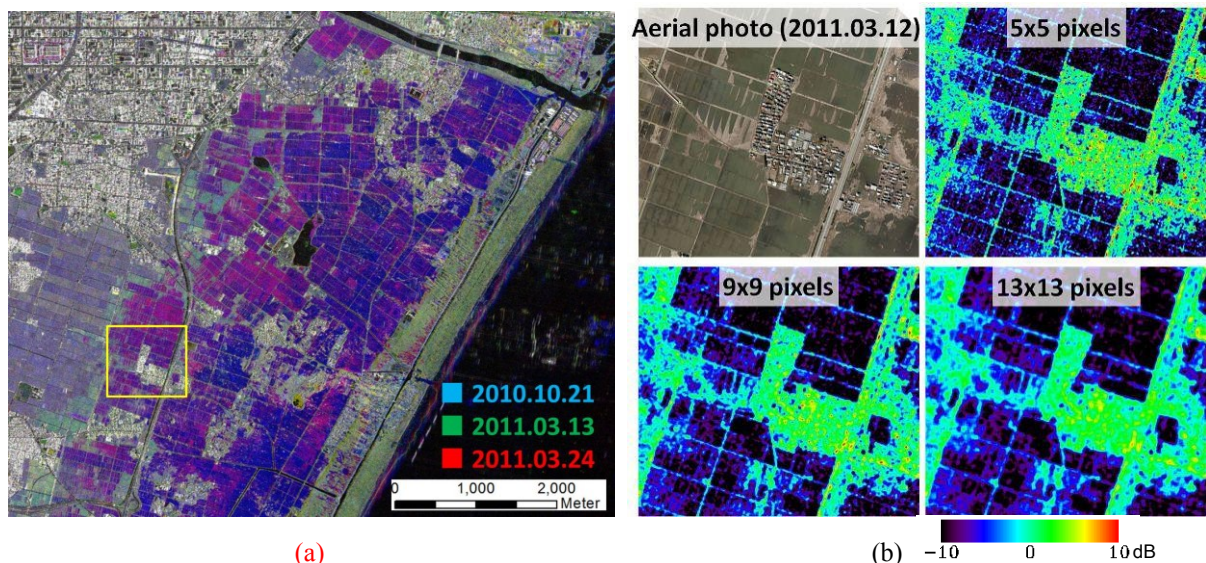


図3 前処理後，図1(b)に示す枠内のエリアにおける3時期の画像を用いたカラー合成図 (a)；(a)に示す枠内の航空写真及び異なるウィンドサイズ(5×5, 9×9, 13×13)で求められた2010年10月21日と2011年3月13日に撮影された画像の平均差分(b)

化によって失う情報が多くなる．5×5, 9×9, 13×13ピクセル，3つのウィンドウで求められた差分図の一部を図3(b)に示す．地震後の3月12日に国土地理院が撮影した航空写真と比較すると，ウィンドウが9×9ピクセル（約14 m×14 m）の時，最も湛水域の輪郭を正しく抽出することができた．ウィンドウが5×5ピクセルの場合，津波の被害を受けた建物の影響による差分が残り，湛水域として誤抽出される．一方，ウィンドウが13×13ピクセルの場合，湛水域と陸地の境界が曖昧になり，抽出しにくくなる．そのため，本研究は9×9ピクセルのウィンドウを用いて，全域における平均差分を求めた．

求められた平均差分図から湛水域を抽出するために，閾値(T)を決める必要がある．本研究では，ヒストグラムの平均値(μ)と標準偏差(σ)を用いた式(1)と，Ostu²¹⁾が提案した手法を試みた．地震前の画像と地震後3月13日の画像から求められた差分図における平均値は $\mu = -1.49$ dBで，標準偏差は $\sigma = 4.97$ dBである．式(1)により閾値が $T_I = -6.46$ dBになる．

$$T = \mu - \sigma \quad (1)$$

Otsu法は，ヒストグラムをもとに最適な閾値を自動的に計算して用いる手法である．閾値は分離度という値が最大となるように，クラス間分散とクラス内分散との比から求められる．Otsu法で求められた閾値は $T_2 = -4.75$ dBであり，より広範囲のエリアが湛水域として抽出された．目視と比較すると，平均値と標準偏差を用いた T_I で抽出された湛水域が目視結果に近いので，閾値として T_I を使用した．事前画像と3月13日に撮影した画像の差分図から差分値が -6.46 dB以下のエリアを3月13日時点の湛水域として抽出した．3月23日の撮影条件は13日のものに近いため，同一地表物の2枚の事後画像における後方散乱係数はほぼ同じであった．そのため，事前画像と3月23日に撮影した画像の差分図から，同様に差分値が -6.46 dB以下のエリアを3月23日時点での湛水域として抽出した．

3.2 抽出結果の修正

平均差分の閾値により抽出された湛水域には，変化した建物などによる影響が含まれている．そこで，抽出結果を改善するために，3つの手法を用いて修正を行った．1つ目は，湛水域内に浮かぶ瓦礫による「穴埋め」である．差分法による湛水域の抽出では，地震後に後方散乱係数が激しく減少した範囲を抽出した．水面に流失した建物の瓦礫が浮かんでいれば，後方散乱係数の減少が小さいか，逆に上昇することになる．そのため，本研究は湛水域に完全に囲まれた非湛水域を湛水域と見なす，抽出結果の修正を行った．

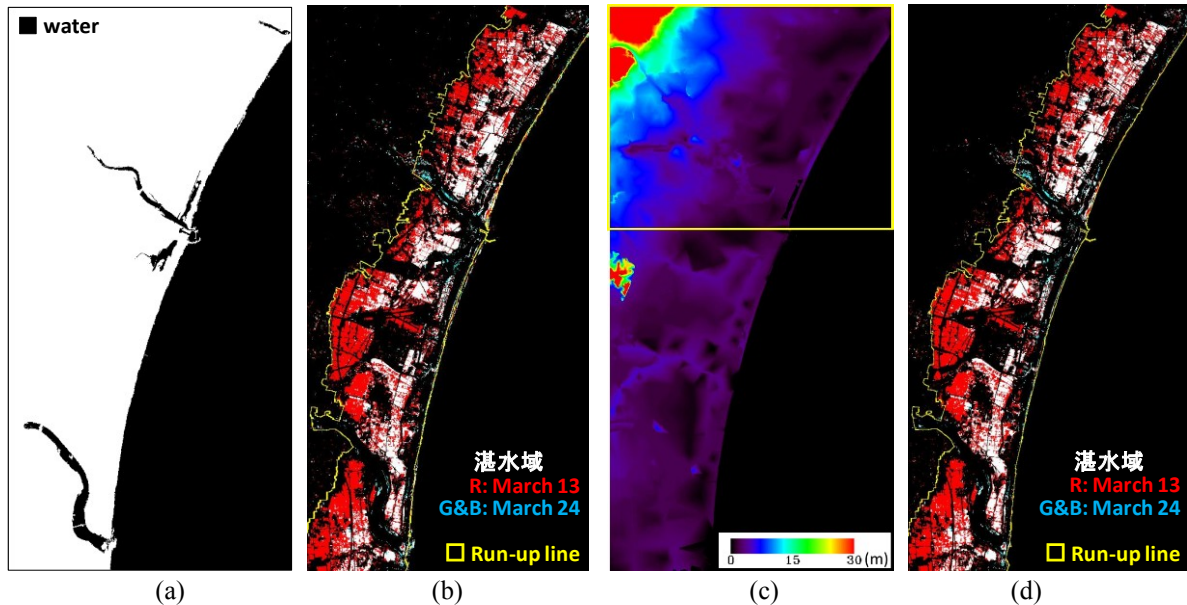


図4 事前画像から得られた水域マスク (a), 平均差分値で抽出された2011年3月13日と24日における湛水域とPASCOが公開した遡上ライン(b), 国土地理院が公開した10mメッシュの標高数値モデル(c)とそれを用いて修正された湛水域 (d)

2つ目は、建物の変化による誤抽出の除去である。津波の浸水以外に、建物の取り壊しや車などの移動する地表物による後方散乱係数の減少がある。それらの変化は、湛水域と比べて面積が断然小さい。対象地域内では、主な湛水エリアは水田であり、1カ所の面積は300 m²以上である。そこで、本研究は面積が200ピクセル(約312 m²)以下の抽出箇所をノイズとして湛水域から除去した。

3つ目は、既存水域の除去である。TSX画像は波長の短いX-bandで観測を行うため、水面の浪によって後方散乱係数が変化することがある。既存の水域内に起きた後方散乱係数の変化は津波による湛水ではないため、抽出された湛水域から除去する必要がある。本研究は地震前の画像上において後方散乱係数が-10.0 dB以下の範囲を既存水域として抽出した。抽出された既存水域を平滑化したものを図4(a)に示す。湛水域の抽出結果から、既存水域を除いた結果を図4(b)に示す。3月13日時点の湛水域を赤バンドで、3月23日時点の湛水域を緑と青バンドで表示した。図4(b)に示す赤い領域が13日までの湛水域で、白色領域が23日まで湛水が続いた範囲である。シアン色のエリアは、13日以降新たに後方散乱係数が減少した地域であり、主に移動した瓦礫や流失した植生に対応すると考えられる。

PASCOは地震前後に撮影された多数の高解像度SAR画像と光学画像を用いて、目視による浸水域の推定を行った²²⁾。その結果となる遡上限界線を図4(b)に黄色線で示す。13日時点では、津波の浸水範囲から水がほとんど引いていないため、抽出された湛水域はPASCOの判読と近い結果となった。遡上範囲外に抽出された「湛水域」を地震後の光学画像で確認したところ、ほとんどが建物の建て替えによる変化域であった。オブジェクトの大きさを誤抽出を減らすことができたが、広い敷地における地震前の変化がまだ湛水域として残っている。

3.3 標高データとの比較

湛水域と標高との関係性を調べるために、国土地理院が公開した5 mメッシュと10 mメッシュの数値標高モデル(DEM)を用いた¹⁾。図4(c)に示す10 mメッシュのDEMで分かるように、対象地域は起伏が少なく主に平地である。最高標高は124 mで、99%のエリアが標高6 m以下である。抽出された湛水域を10 mメッシュのDEMに重ねると、99%の湛水域が標高4m以下にあった。そこで、市街地内の広い建物による誤抽出を減らすため、標高が4 m以上の湛水域を誤抽出として除去し、結果を図4(d)に示す。標高制限を導入したことで、抽出された湛水域に含まれる誤抽出が減り、遡上限界線との一致度が高まった。

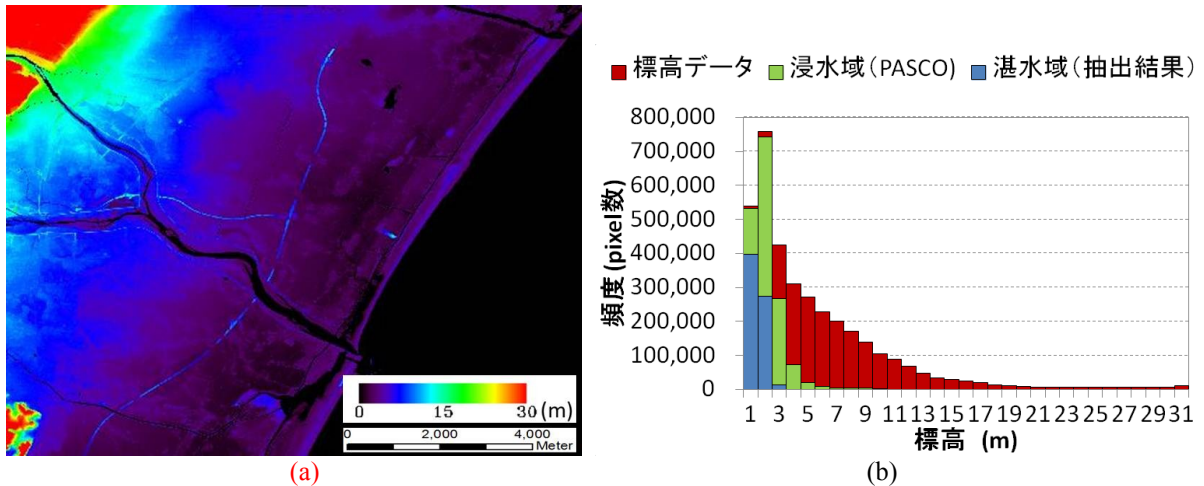


図5 国土地理院が公開した5mメッシュの標高モデル(a)とそれを用いた浸水域 (PASCO), 抽出された湛水域の標高ヒストグラム (b)

遡上境界線を正解として、同じく既存水域を除いたものを用いて3月13日時点で抽出された湛水域の精度を評価した。対象エリア全体に対する総合精度は80.67%であった。そのうち、湛水域におけるユーザー精度(U. A.)は98.9%で、プロデューサー精度(P. A.)は42.5%であった。PASCOが推定した浸水域では、津波の被害を受けた湛水していない住宅地も含まれているため、抽出結果のP.A.は低かった。また、仙台空港の滑走路など水域と同様に平坦であるため、地震前の画像における後方散乱係数が低く、地震後に湛水しても本研究の手法では自動的に抽出することができなかった。しかし、高いユーザー精度から抽出された湛水域は、ほとんどが遡上境界線内であることが分かった。

約3 m地上解像度のTSX画像に比べ、10 mメッシュの標高データでは川の位置が一致しないことや、細かい標高差による湛水域と遡上境界の違いが把握しにくいなどの問題点があった。そこで、図5(a)に示す仙台市周辺における5 mメッシュのDEMを用いた。10 mメッシュのDEMと比べて、高速道路や日和山 (名取市閑上地区) などの起伏の小さい地形も表示されている。1 mごとの標高におけるPASCOの推定浸水域 (遡上境界) と本研究で抽出された湛水域のヒストグラムを図5(b)に示す。対象エリアでは浸水深10 mほどの津波が襲ったため、遡上境界線が標高10 mの地域にまで及ぶ。しかし、3月13日での湛水域はすべて標高3 m以下であり、そのうち98%が標高2 m以下の地域に存在する。この特性を利用し、今後では本研究で抽出できなかった湛水した道路や平地を、周辺の湛水状況から抽出できるように手法を改善する。

4. 建物被害の検出

本震が引き起こした10 mを超える巨大津波によって、沿岸にあった多数の建物が流失した。被害が広範囲にわたるため、1棟単位での現地調査は困難であった。本研究では、TSXの高解像度を生かし、地震前後に撮影された画像と、郷右近・越村がゼンリンのデータを基づき、作成した建物被害地図²³⁾から得られた建物の輪郭データ (図6(a))を用いて、津波で被害を受けた建物を1棟単位で検出する。

4.1 変化係数の構築

湛水域と違って、被害を受けた建物の後方散乱係数は減少するだけでなく、上昇するケースもある。また、変化しない建物は2時期の画像上で高い相関が得られる。この2つの特性を利用し、本研究ではリュウ・山崎²⁰⁾が提案した差分と相関係数を合成した変化量「合成変化量 z 」を用いた。地震前画像と3月13日の画像から変化量 z_1 、地震前画像と3月24日の画像から変化量 z_2 を式(2)で求め、図6(b-c)に示す。

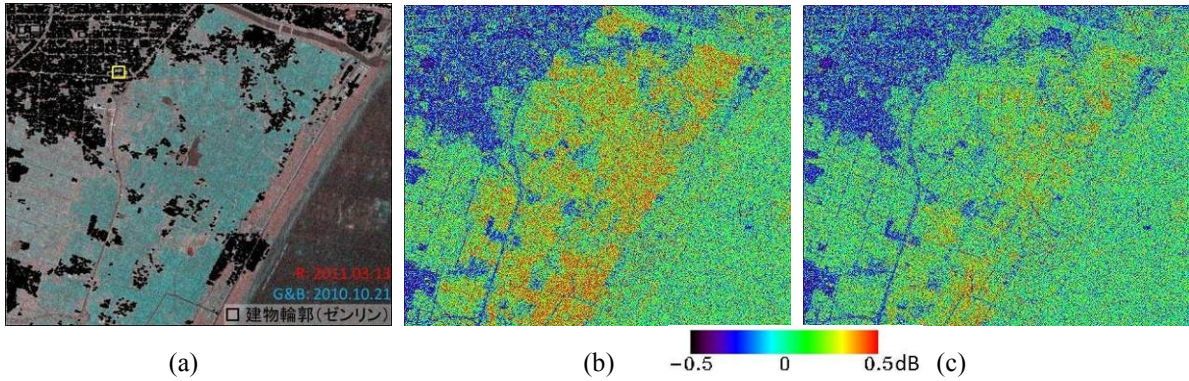


図6 1棟単位の建物輪郭データを地震前後画像のカラー合成図に重ね合わせたものの一部(a)；地震前画像と3月13日の画像から得られた合成変化量 z_1 (b)と、地震前画像と3月24日の画像から得られた合成変化量 z_2 (c)

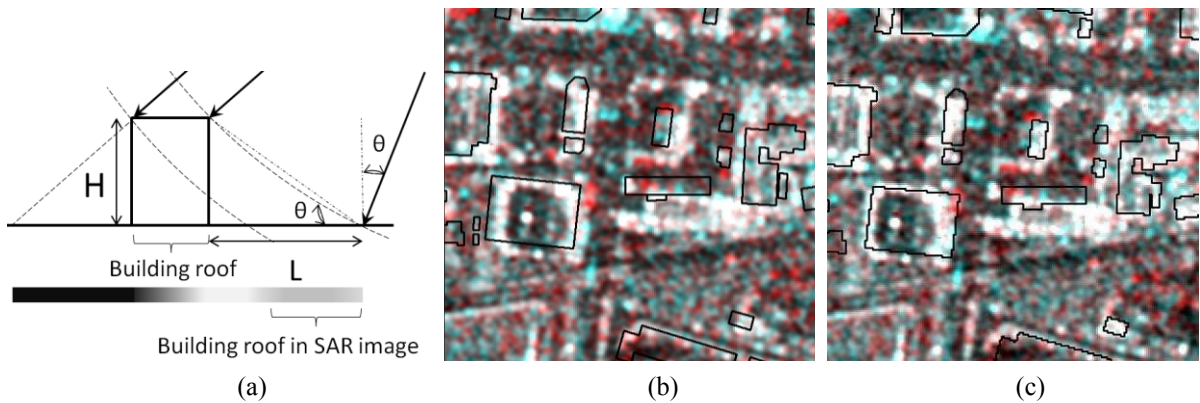


図7 建物と SAR 画像の関係の模式図(a)；図6(a)に示す枠内の拡大図(b)と建物輪郭を移動した後の拡大図(c)

$$z = \left| \frac{d}{\max|d|} \right| - c \cdot r \quad (2)$$

ここで、 d は平均差分であり、 \max は検討範囲における最大値を表す。 r は式(3)で求められた相関係数であり、 c は0から1の範囲の重みである。

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N I a_i I b_i - \sum_{i=1}^N I a_i \sum_{i=1}^N I b_i}{\sqrt{\left(N \sum_{i=1}^N I a_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N I a_i \right)^2 \right) \left(N \sum_{i=1}^N I b_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N I b_i \right)^2 \right)}} \quad (3)$$

ここで i はピクセル番号であり、 $I a_i$ と $I b_i$ は地震前と地震後の画像における後方散乱係数であり、 \bar{I} は N ($=5 \times 5$)ピクセルのウィンドウ内における後方散乱係数の平均値である。

建物の面積は湛水する水田に比べて小さいため、平均差分と相関係数を求める際のウィンドウを小さめの 5×5 ピクセルに設定した。また、相関係数は差分より不安定であり、重みを $c = 0.5$ に設定した。算出された合成変化量は、 -0.5 から 1.5 までの小数である。変化量が大きいくほど、変化した可能性が高い。図6(b-c)では、沿岸の湛水した地域における合成変化量は大きく、赤く表示されている。また西北方向にある市街地では合成変化量は小さく、青く表示されている。

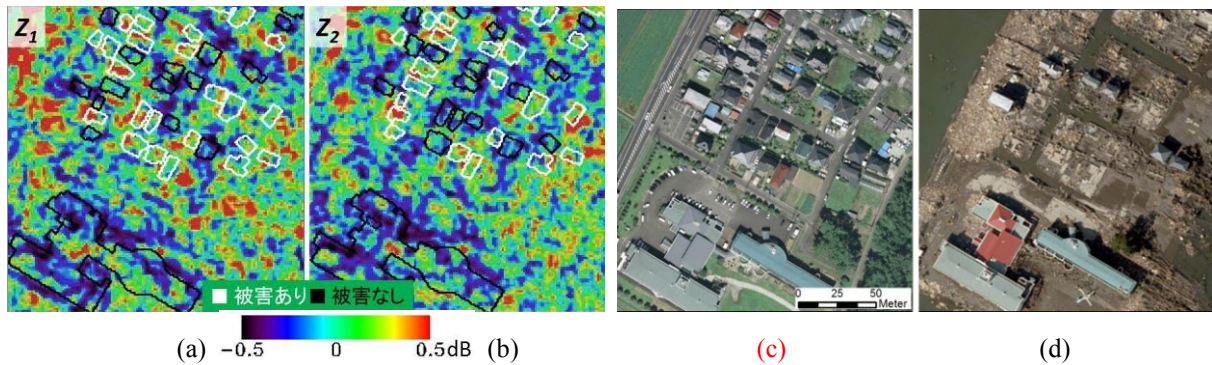


図8 z_1 と z_2 を用いてそれぞれ検出された建物の被害(a-b) ; Google Earthから切り出した2009年8月14日に撮影された航空写真(c)と国土地理院が2011年3月12日に撮影した航空写真(d)

4.2 建物被害の抽出

輪郭内の変化量が大きい建物を、被害を受けたものと判断する。しかし、レーダが斜めに観測するため、SAR画像上における建物位置は図7(a)に示すように、実際の位置から衛星センサ方向へ倒れ込む。この倒れ込みの距離は建物高さに比例する。1棟単位の建物輪郭データを地震前後のカラー合成図に重ねたものを図7(b)に示す。最も後方散乱係数が高いコーナー反射する建物の壁は、建物の輪郭外にある。こういった建物が変化しても輪郭内における変化係数は低い。そこで、本研究では建物輪郭データをセンサ方向(右下)に移動し、後方散乱係数の高い建物外壁を輪郭内に収める。倒れこむ距離 L と建物の高さ H の関係を式(4)に示す。

$$L = H / \tan\theta \quad (4)$$

ここで、 θ はセンサの観測角度である。

1棟ごとに建物の高さ情報がないため、本研究では全ての建物を2階建て、高さ6mと見なすことにする。観測角度が 37.3° であることから、倒れ込み距離は約7.9 mになる。また、撮影する軌道方位は北から時計まわりに 190.0° であることから、レンジ方向への倒れこむ量は、東(x軸方向)へ約7.8 mと南(y軸方向)へ約1.4 mに分けられる。そのため、建物輪郭データを倒れこむ方向に沿って東へ6ピクセル、南へ2ピクセル移動した。移動後の輪郭データをカラー合成図に重ねた結果を図7(c)に示す。図7(b)と比べて、輪郭内に後方散乱係数の高い部分が多く含まれるようになった。

移動後の建物輪郭内において、合成変化量の平均値が0以上の建物を被害ありと見なして抽出した。13日の変化量 z_1 と23日の変化量 z_2 を用いて、それぞれに抽出した結果の一部を図8(a-b)に示す。図8(c-d)に示す地震前後の航空写真と比較すると、完全に流失して無くなった建物が、3月13日と23日画像からともに抽出することができた。しかし、13日の画像上には、流失したものの同じ位置に存在する瓦礫によって後方散乱係数の変化が小さく、抽出できなかった建物も存在する。瓦礫の移動によって23日の画像からは抽出できた建物もある。そこで、本研究では z_1 と z_2 の両方を用いて、1時期でも合成変化量が0以上であれば被害建物とした。検出結果を図9(a)に示す。

4.3 検出結果の修正と精度の評価

図9(a)に示す建物被害の検出結果と前章で抽出された湛水域を比較すると、湛水域外に被害ありと判断された建物が多数存在した。そのうちの一部を図10(a)に示す。同一エリアを地震前後で撮影した航空写真を図10(b-c)に示す。航空写真から、近隣する10棟の建物が建て替えられたことが確認できる。それらの建物は被害を受けたものと誤検出された。また、隣接した3棟の建物が同時に変化したため、後方散乱係数の減少する面積が大きく、湛水域としても誤抽出された。このような市街地において変化した建物を被害建物から除くためには、PASCOが公開した遡上限界線を用いることが有効である。しかし、目視による浸水域の推定結果がない場合を想定し、本研究はSAR画像のみで抽出された湛水域の結果を使用した。湛水域は遡上範囲と違って、浸水域を完全にカバーすることができない。そのため、本研究では対象エリアが太平洋の東岸である地理特性を生かし、変化した建物の西側に湛水域

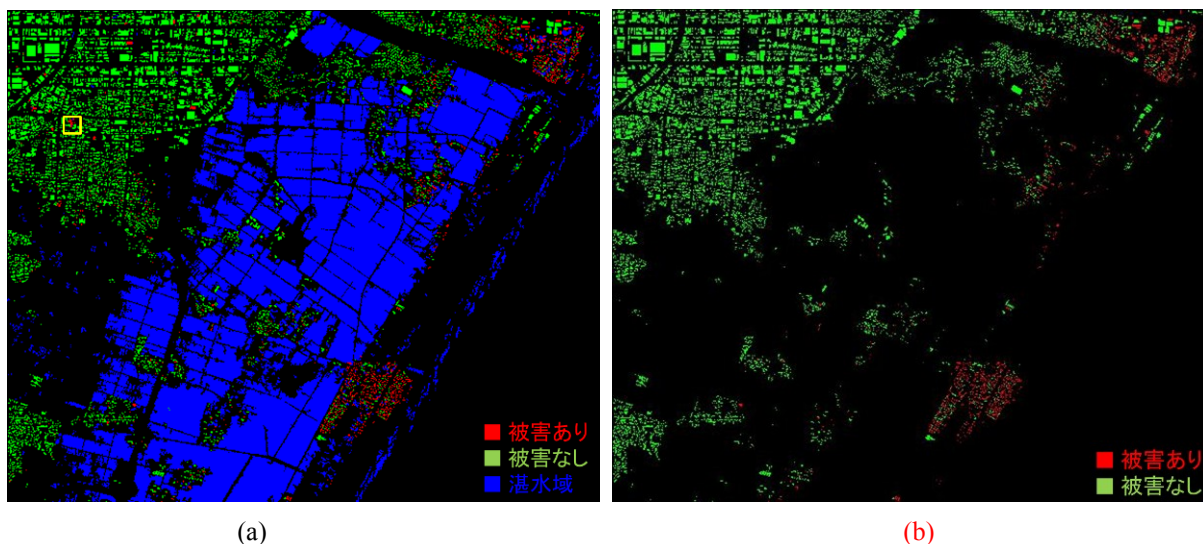


図9 z_1 と z_2 の両方を用いた建物被害の分類結果と3月13日時点の湛水域(a) ; 湛水域を用いて修正した建物被害の分布(b)

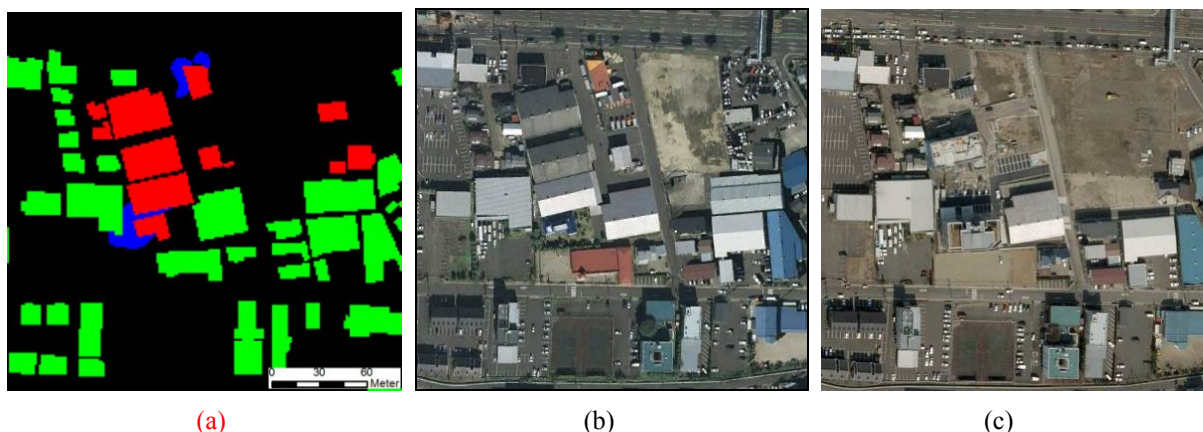


図10 図9(a)の黄色枠内の拡大図(a) ; 地震前2009年8月14日に撮影された航空写真(b)と国土地理院が2011年3月12日に撮影した航空写真(c)

がなければ被害なしと判断する。前章で抽出された湛水域におけるユーザー精度は高いものの、まだ図10(a)に示すようなノイズを含めている。そこで、建物の面積より小さい、もしくは幅が20ピクセル(25 m)以下の湛水域を無効とした。湛水域を用いて修正した建物被害の検出結果を図9(b)に示すが、西側の市街地にある建物被害の誤検出を完全に除くことができた。湛水域を用いた修正は、地震動による建物被害を結果から除くことになる。そのため、対象地域におけるすべての建物の被害を把握する際は行わないことが望ましい。

検出結果の精度を検証するため、図11に示す郷右近・越村²³⁾が作成した建物被害地図との比較を行った。対象エリア内に含まれる約4.5万棟の建物に対し、面積で評価した精度を表1(a)に、棟数で評価した精度を表1(b)に示す。面積で評価した場合、総合精度が約95%であり、そのうち被害のP. A.が82%で、U. A.が71%である。一方、棟数で評価した場合は、総合精度が約94%であり、そのうち被害のP. A.が79%で、U. A.が74%である。棟数で評価した精度が面積で評価した精度より低いことから、面積の小さい建物における誤検出が多いと考えられる。誤検出の原因としては、主に以下の2つ挙げられる。1つ目は、輪郭データとSAR画像上の建物が一致しないことである。建物の高さ情報がないため、すべての建物を6 mの高さで見なして輪郭データを移動したが、1階や3階の建物に対して輪郭が合わなかった。それによって、合成変化量の高い部分が輪郭から外れて、被害が検出できなかったり、変化して

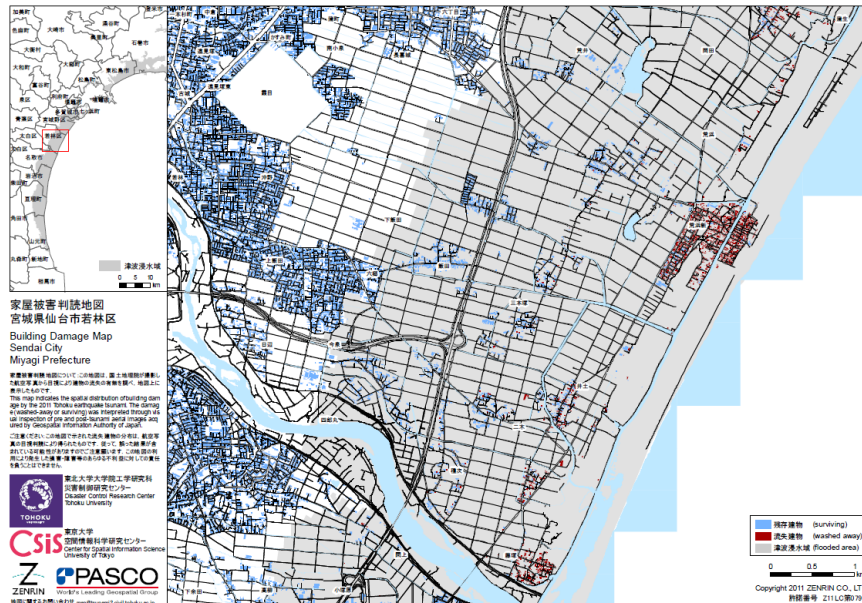


図 11 国土地理院の航空写真による目視判読で作成された建物被害地図²³⁾

表 1 建物被害地図を用いて、面積で評価した精度(a)と棟数で評価した精度(b)

		建物被害地図の結果 (%)				建物被害地図の結果 (棟)				
		流失	残存	合計	U. A.	流失	残存	合計	U. A.	
本研究の 本研究成果	被害あり	7.6	3.1	10.7	70.6	被害あり	4,309	1,496	5,805	74.2%
	被害なし	1.6	87.7	89.3	97.0	被害なし	1,163	37,627	38,790	97.0%
	合計	9.2	90.8	100.0		合計	5,472	39,123	44,595	
	P. A.	82.2	96.5		95.2	P. A.	78.7%	96.2%		94.0%

ない建物の輪郭内に湛水域を含めて誤検出されたりなどの問題が生じた。2つ目は、瓦礫による影響である。図8に示すように、瓦礫による後方散乱で建物の合成変化量が小さく、被害なしと判断される場合が見られた。

6. まとめ

本研究では地震などの災害発生後の緊急対応への利用を目的として、地震前後に撮影された高解像度衛星TerraSAR-Xの強度画像を用いた被害状況の把握を行った。2011年東北地方太平洋沖地震の前後画像から、後方散乱係数が減少した津波による湛水域を平均差分値によって抽出した。抽出に使用するウィンドウ幅やその閾値を、航空写真と比較して検討した。そして、PASCOが公開した津波遡上範囲図と比較したところ、すべての湛水域を抽出することはできなかったものの、抽出された湛水域は約99%の高いユーザー精度であった。また、国土地理院が公開した標高データを用いて、津波の遡上範囲と湛水域が標高との関係性を調べた。

さらに後方散乱係数の変化を利用して、津波によって流失した建物の検出も行った。1棟単位の建物輪郭データを用いて、輪郭内の平均変化量により被害の有無を分類した。その結果を航空写真による目視結果と比較し、90%以上の総合精度で被害の有無を検出できたことが分かった。広範囲における被害を自動的に把握することは、目視判読に比べて精度がやや劣るものの、人力と時間の節約ができ、災害後の迅速な対応が期待できる。今後はさらに、建物の高さ情報を用いるなどの手法の改善や、合

成変化量についての追加検討を行う予定である。

謝 辞

この研究で用いたTerraSAR-X 画像は、SAR 技術応用研究会のH23 年度研究課題として、株式会社パスコから提供されたものである。

参考文献

- 1) GSI: http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html.
- 2) Horritt, M.S.: A statistical active contour model for SAR image segmentation, *Image and Vision Computing*, Vol.17, 1999, pp: 213-224.
- 3) Ahton, P., Euro, M., Hallikainen, M., Solbø, S., Johansen, B., and Solheim, I.: SAR and optical based algorithms for estimation of water bodies, Technical report, Flood Man Project, 2004.
- 4) Matgen, P., Schumann, G., Henry, J.-B., Hoffmann, L., and Pfister, L.: Integration of SAR-derived inundation areas, high precision topographic data and a river flow model toward real-time flood management, *Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 9, 2007, pp. 247-263.
- 5) Heremans, R., Willekens, A., Borghys, D., Verbeeck, B., Valckenborg, J., Acheroy, M., and Perneel, C.: Automatic detection of flooded areas on ENVISAT/ASAR images using an object-oriented classification technique and an active contour algorithm, *Proceeding IEEE Conference on Recent Advances in Space Technologies*, 2003, pp. 289-294.
- 6) Geudtner, D., Winter, R., and Vachon, P.: Flood monitoring using ESR-1 SAR interferometry coherence maps, *Proceeding of Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vol. II, 1996, pp. 966-968.
- 7) Dellepiane, S., Bo, G., Monni, S., and Buck, C.: SAR images and interferometric coherence for flood monitoring, *Proceeding of Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Vol. XI, 2000, pp. 2608-2610.
- 8) 小荒井衛, 茂木公一, 渡辺信之, 徳田正幸, 大石哲, 河合雅己: SAR による災害状況把握—那珂川水害の例—, *日本リモートセンシング学会第28 回学術講演会論文集*, 2000, pp. 55-56.
- 9) 高埴琢馬, 椎葉充晴, 立川康人, 寶馨: 衛星搭載合成開口レーダによる流域地表面特性の把握に関する基礎的検討, *京都大学防災研究所年報*, No. 37, 1994, pp. 195-207.
- 10) 加藤圭太, 山崎文雄: 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, *日本地震工学会論文集*, Vol. 10, No. 3, 2010, pp. 1-11.
- 11) 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, 2001, pp.54-61.
- 12) 松岡昌志, 山崎文雄: 人工衛星SAR強度画像による建物被害地域の検出手法, *日本建築学会構造系論文集*, No.551, 2002, pp.53-60.
- 13) 松岡昌志, 山崎文雄: 人工衛星SAR強度画像を用いた被害地域手法の最近の地震への適用とその妥当性の検討, *日本建築学会構造系論文集*, No.558, 2002, pp.139-147.
- 14) Ito, Y., Hosokawa, M., Lee, H., and Liu, J. G.: Extraction of Damaged Regions Using SAR Data and Neural Networks, *ISPRS2000, International Activities of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII, Part B1, 2000, pp.156-163.
- 15) Yonezawa, C. and Takeuchi, S.: Decorrelation of SAR Data by Urban Damages Caused by the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.22, No.8, 2001, pp.1585-1600.
- 16) Brunner, D., Lemoine, G., and Bruzzone, L.: Earthquake Damage Assessment of Buildings Using VHR Optical and SAR Imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 48, No. 5, 2010, pp. 2403-2420.
- 17) Wang, T. L., and Jin, Y.Q.: Postearthquake Building Damage Assessment Using Multi-Mutual Information Form Pre-Event Optical Image and Postevent SAR Image, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 9, No. 3, 2012, pp. 452-456.
- 18) Lopes, A., Touzi, R., and Nezry, E.: Adaptive Speckle Filters and Scene Heterogeneity, *IEEE Transactions*

on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, No. 6, 1990, pp. 992-1000.

- 19) リュウ・ウエン, 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, 日本リモートセンシング学会第51回学術講演会論文集, 2011, pp.7-10.
- 20) リュウ・ウエン, 山崎文雄: 高解像度TerraSAR-X画像を用いた羽田空港再拡張事業のモニタリング, 日本リモートセンシング学会第50回学術講演会論文集, 2011, pp. 141-142.
- 21) Otsu, N.: A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-9, No. 1, 1979, pp. 62-66.
- 22) PASCO: http://www.pasco.co.jp/disaster_info/110311/.
- 23) Gokon, H., and Koshimura S.: Mapping of Building Damage of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami in Miyagi Prefecture, Coastal Engineering Journal, Vol. 54, No. 1, 2012.

(受理: 2012年 2月 28日)

(掲載決定: 2012年 6月 13日)

Extraction of Tsunami Inundation Areas and Damaged Buildings for the 2011 Tohoku, Japan Earthquake from High-resolution SAR images

LIU Wen ¹⁾, YAMAZAKI Fumio ²⁾, GOKON Hideomi ³⁾
and KOSHIMURA Shun-ichi ⁴⁾

1) Student member, PhD. Student, Graduate School of Engineering, Chiba University; JSPS research fellow.

2) Member, Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

3) Student member, Graduate Student, Disaster Control Research Center, Tohoku University.

4) Member, Professor, Disaster Control Research Center, Tohoku University, Dr. Eng.

ABSTRACT

The Tohoku earthquake on March 11, 2011, which occurred off the Pacific coast of the northeastern (Tohoku) Japan, caused gigantic tsunamis and brought vast devastation and a huge number of human casualties. Various high-resolution satellites quickly captured the details of affected areas, and were used for emergency response. In this study, the extraction of tsunami inundation areas and damaged buildings were carried out using high resolution pre- and post-event synthetic aperture radar (SAR) images. Since the water surface generally shows very low backscattering intensity, the inundation areas could be extracted by the difference of SAR backscattered intensity between the pre- and post-event images obtained by TerraSAR-X. Then, the changed buildings were detected by calculating the difference and correlation coefficient in the shape of a building. When a changed building was enclosed by the inundation areas, this building was labeled as a damaged building by tsunami. Finally, the results were compared with visual interoperation results to examine the accuracy of the proposed method.

Key Words: Synthetic Aperture Radar, Difference, Correlation Coefficient, Inundation, Damaged Building