



## 高解像度衛星 SAR 画像を用いた建物側面の被害把握

岩崎洋志<sup>1)</sup>、山崎文雄<sup>2)</sup>、リュウ・ウエン<sup>3)</sup>、野中崇志<sup>4)</sup>、笹川正<sup>4)</sup>

1) 非会員 千葉県県土整備部 (元千葉大学大学院生)、修 (工)

e-mail : iwasakiyoji@gmail.com

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) 正会員 東京工業大学大学院 総合理工学研究科・日本学術振興会外国人特別研究員、博 (工)

e-mail : liu.w.ad@m.titech.ac.jp

4) 非会員 株式会社パスコ 衛星事業部

e-mail : taakka9299@pasco.co.jp, taawda5004@pasco.co.jp

### 要 約

衛星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あった。そこで本研究では、高解像度の衛星搭載合成開口レーダ(SAR)で得られた地震前後の強度画像を用い、画像上の倒れ込み領域とレーダー影から個別建物の形状変化を把握し、被害抽出を試みた。仙台塩釜港周辺の建物と福島第一原子力発電所を対象として、多時期のTerraSAR-X画像を使用して、災害前後の倒れ込み領域とレーダー影内の後方散乱の変化を観察した。その結果、津波によって側面が損壊した建物や、爆発によって上部が吹き飛んだ原子炉建屋の被害を捉えることができた。

キーワード： 2011年東北地方太平洋沖地震、建物被害、合成開口レーダ、倒れ込み、レーダー影

### 1. 研究背景と目的

地震・津波などの自然災害の発生時には、被災状況の迅速な把握が必要である。しかし、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）のように、被害が広域にわたり、かつ道路網が寸断した場合には、情報収集に多大な時間を要する。このような場合の早期の情報収集手段として、衛星や航空機からのリモートセンシングの活用が考えられる<sup>1)3)</sup>。とくに東日本大震災の場合は、福島第一原発事故による放射性物質の漏洩が発生し、対象区域内の立ち入りや上空の飛行が不可能となった。このため、衛星リモートセンシングや無人機からの画像・映像が大きな情報源となった<sup>4)5)</sup>。

衛星リモートセンシングで利用されるセンサは、光学センサ、熱赤外センサ、合成開口レーダ(SAR)に大別される。光学センサ衛星としては、Landsatシリーズ、SPOTシリーズ、Terra/ASTERなど解像度10-30m程度の中解像度地球観測衛星が従来主流であったが、最近は、解像度が最大50~60cm程度の商業用高解像度衛星（QuickBird、GeoEye、WorldViewなど）が次々に上げられ、得られた画像から建築物の詳細な形状などを把握することも可能となった。実際に、2004年イラン・バム地震<sup>6)</sup>、2006年インドネシア・ジャワ島中部地震<sup>7)</sup>、2010年ハイチ地震<sup>8)</sup>などで建物被害の抽出に利用され、“Crowdsourcing”

という、多数の画像判読ボランティアに頼って広域の被害目視判読を分担で行う試みも行われている<sup>9)</sup>。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、目視判読や画像解析によって現地状況を容易に把握できる点である。しかし、光学画像の撮影は、太陽光のある日中に限定されるとともに天候条件に左右され、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。また、ほぼ直下視の衛星画像を用いた被害判読では、建物の上面しか確認することができず、壁などの側面の被害や中間層崩壊などの被害パターンは判読が困難で、実際の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。筆者らは<sup>10)</sup>、2003年アルジェリア地震前後に得られた高解像度光学センサ衛星画像<sup>11)</sup>における日影から建物高さを計測し、その高さの変化を利用することで、倒壊などの形状変化をもたらす大被害の把握を行っている。

熱赤外センサはTerra/ASTERやLandsatなどの衛星に搭載され、その画像を用いて津波や洪水による浸水域の把握<sup>12)-14)</sup>などに利用されている。熱赤外センサは、地表面からの熱放射を観測する機構であることから、昼夜とも使用可能であるが、雲があると地表の観測はできない。また、解像度は60-90mと光学センサに比べると大幅に低く、個別の建物の被害把握への利用は難しい。

光学センサや熱赤外センサに比べると、合成開口レーダ（SAR）は災害発生時の撮影機会に恵まれている。SARでは、衛星からマイクロ波を能動的に照射し、その反射波を観測することにより地表面の状況を把握する。SAR画像は、単偏波観測の場合は白黒で情報量が少ないものの、昼夜や天候に左右されることなく撮影が可能であり、災害時の緊急対応に適する。10-30m程度の中解像度のSAR画像に基づく市街地レベルの地震被害把握に関しては、松岡ら<sup>15)-17)</sup>による一連の研究が挙げられる。また、斜面崩壊や浸水域の把握などにも利用されている<sup>18), 19)</sup>。SARセンサに関しても、最近、解像度の向上が目覚ましく、TerraSAR-X (TSX)やCOSMO-SkyMed (CSM)といった地上解像度1-5mの高分解能SAR衛星が稼働を始めた。これらから得られたSAR強度画像を用いて、地殻変動の抽出<sup>20), 21)</sup>、津波浸水域の抽出<sup>22)</sup>、建物被害把握<sup>23), 24)</sup>などが既に行われている。

本研究では、東北地方太平洋沖地震の前後に撮影された解像度約3mのStripMapモードのTSX画像を使用して、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やレーダー影といった基本的な特徴を利用し、それらの領域の変化から構造物の形状変化を推定し、被害状況の把握を試みる。

## 2. 倒れ込み範囲におけるSAR強度平均値の変化による建物被害推定

### 2.1 対象地域と使用データ

まず、東北地方太平洋沖地震において津波被害を受けた仙台塩釜港を対象に、倒れ込み範囲の後方散乱係数値の変化から被害を検出する検討を行う。この地震では、東北地方の太平洋沿岸を中心に、北海道から鹿児島県にかけての各観測施設で津波を観測した。とくに三陸沿岸では、リアス式海岸という特異な地形が津波高さを増大させ、最大40.1mの津波の遡上高が観察されている<sup>25)</sup>。この地震による建物被害は全壊家屋が約129,000棟、半壊家屋が約270,000棟という膨大な数にのぼる<sup>26)</sup>。

津波による建物被害は、地震による震動被害とは異なり、**図1**のように建物側面や建物下部への被害が特徴的であり、筆者らが現地調査を行った際にもこのような被害モードが多数見られた。このような被害は、直下視の光学衛星画像や航空写真を用いて被害判読を行う際には、建物上面に変化が見られないため把握が困難であり、被害の過小評価を招く。そこでここでは、SAR画像の斜め照射特性を用いて、津波による構造物側面の被害の検出を試みる。

仙台市付近を対象として、同じ条件で撮影された多時期のTerraSAR-X (TSX)画像を使用し、画像上の後方散乱係数値の変化を把握し、実際の被害状況と比較する。まずGoogleEarthストリートビュー<sup>27)</sup>上で、津波により側面に被害を受けた建物13棟と浸水域外の無被害の建物13棟を抽出し、被害の有無によるSAR画像の後方散乱係数値の違いを比較する。この検討で得られた結果から閾値を設定し、仙台塩釜港の建物、計101棟を対象に、提案手法を用いて被害建物を抽出し、復興支援調査アーカイブ<sup>28)</sup>における現地調査結果と比較して精度の評価を行う。

本検討では、2010年10月21日、2011年3月13日、2011年4月4日に撮影された計3時期のTSX画像を用い

た<sup>29)</sup>。これらはいずれも、下降軌道 (280°) から観測角度37.3° で、HH偏波によりStripMapモードで撮影されたものである。元画像の空間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。使用画像は、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 (図2)。各画像は、デジタルナンバーから後方散乱係数 $\sigma^0$ へと変換した後<sup>30)</sup>、Leeフィルタ<sup>31)</sup>を3×3のウインドウで適用しスッペクルノイズを低減した。

東北地方太平洋沖地震では、本震およびその後の余震によって東北地方を中心に著しい地殻変動が発生した。国土地理院が全国1,240箇所に設置したGPSを用いた電子基準点(GEONET) の記録によると、本震 (M9.0) では、最大で水平方向に約5.3m、上下方向に約1.2mという極めて大きな地殻変動が観測された<sup>32)</sup>。そのため、SAR衛星の軌道情報のみから位置を定義した事前・事後画像ではズレが生じる<sup>29)</sup>。地震前後画像を用いて個別建物の変化を求める本検証では、このズレは誤差要因となる。そのため、本研究で対象となる1km<sup>2</sup>以下の範囲で切り出した事後画像を東へ2 pixel、南へ1 pixel移動させ、地殻変動量をほぼ打ち消すような位置補正を行った<sup>22)</sup>。



図1 津波による特徴的な建物被害の例  
(筆者らが女川町において2011年7月10日撮影)

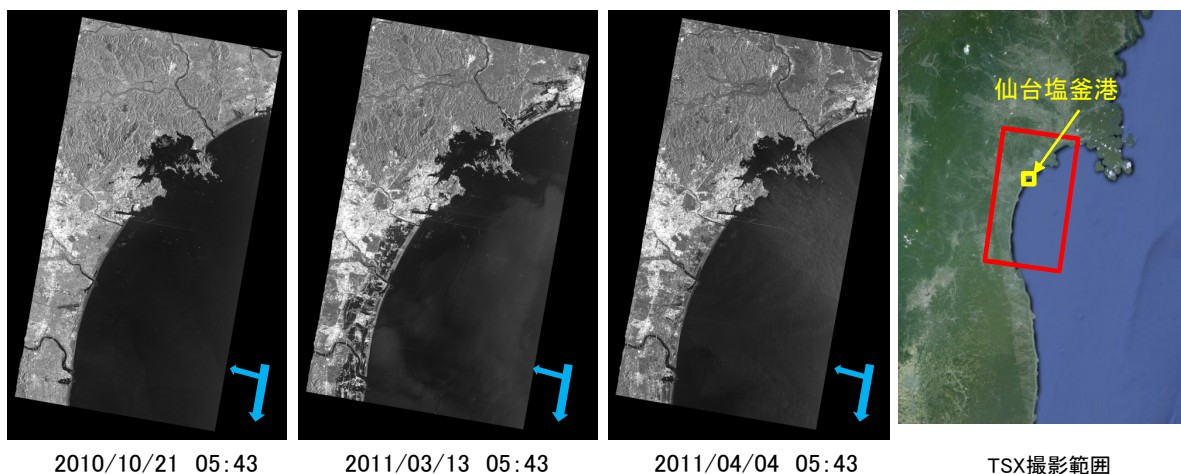


図2 使用した宮城県沿岸地域の3時期の TerraSAR-X 画像とその範囲

## 2.2 倒れ込み範囲における強度平均値の変化による建物被害推定手法

SAR画像では衛星が斜め上方から照射したマイクロ波の後方散乱波を観測することによって、地表面の状況を認識する。そのため図3に示すように、地表面に立つ建物はグラウンドレンジ上で倒れ込みを起こし、倒れ込み範囲での後方散乱の値は地表面からの反射に加えて、建物側面からの反射を含んだ値となる<sup>33)</sup>。ここで、実線の青色矢印はマイクロ波の入射を示しており、a-eはそれぞれ地面、建物の接地部輪郭、壁、屋根の輪郭、屋根からの後方散乱であり、fはレーダー影における後方散乱を示す。緑色点線



はそれぞれの部分が画像上に投影したときの場所を示す。ここでは、建物側面の接地面から屋根輪郭まで、グラウンドレンジ画像上で建物側面からの反射に対応する部分、すなわち $L$ の範囲を倒れ込み範囲と定義する。また、建物の存在のため、建物接地幅 $B$ と長さ $L'$ を合わせた範囲の $f$ がレーダー影になる。

$$L = H / \tan \theta \quad (1)$$

$$L' = H \tan \theta \quad (2)$$

ここで、 $\theta$ はマイクロ波の観測（入射）角、 $H$ は建物高さ、 $L$ は倒れ込み長、 $(L+B)$ はレーダー影長である。図3(d)に示す例では、津波によって建物側面が破損し、倒れ込み範囲 $L$ 内では壁の反射量が少なくなり、後方散乱強度( $a+c$ )の範囲が狭くなる。一方、マイクロ波が破損した側面の壁を透過することでレーダー影 $f$ の範囲が狭くなり、その範囲内の後方散乱強度が上昇する。

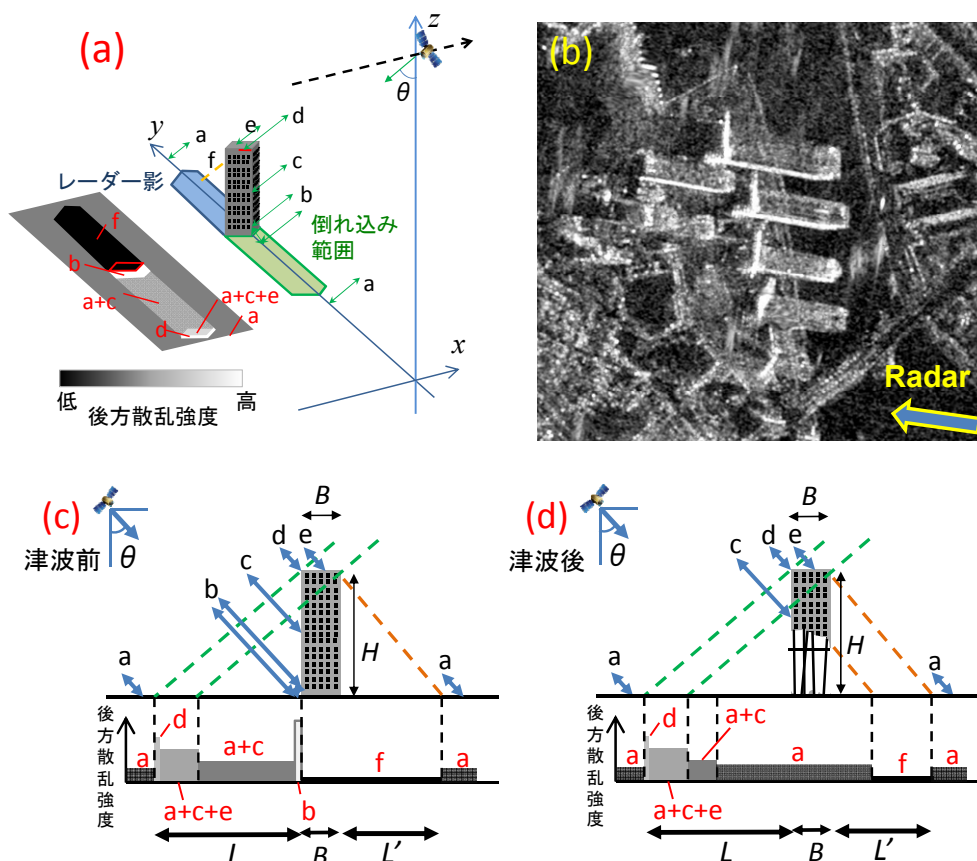


図3 a 観測点と後方散乱強度の関係、b 高層建物の TSX 画像、c、d 津波前後の後方散乱強度



図4 倒れ込み範囲を用いた被害把握手法の検討対象地と対象建物（被害あり a-m、被害なし n-z）

本研究では、まずGoogleEarthの光学画像<sup>27)</sup>から建物輪郭を作成し、この輪郭を津波前のSAR画像に重ね合わせ、目視で比較しながらマイクロ波の照射方向に移動させ、倒れ込み輪郭を作成する。この際、光学画像の日影長さ<sup>10)</sup>とGoogleEarthストリートビューの写真<sup>27)</sup>からも、建物の推定高さが適切かどうか確認した。この倒れ込み輪郭内の後方散乱係数値を集計し、その2期間の変化から建物側面の津波による被害の把握を試みる。

### 2.3 被害の有無による倒れ込み範囲の値の変化比較

今回対象とした側面に被害を受けた建物13棟と無被害の建物13棟の光学画像を図4に示す。また、図5に3時期のTSX画像の各建物の倒れ込み範囲の後方散乱係数の平均値、標準偏差を示したグラフを、図6に各建物の倒れ込み範囲内の後方散乱係数の事後・事前画像の差分を示す。

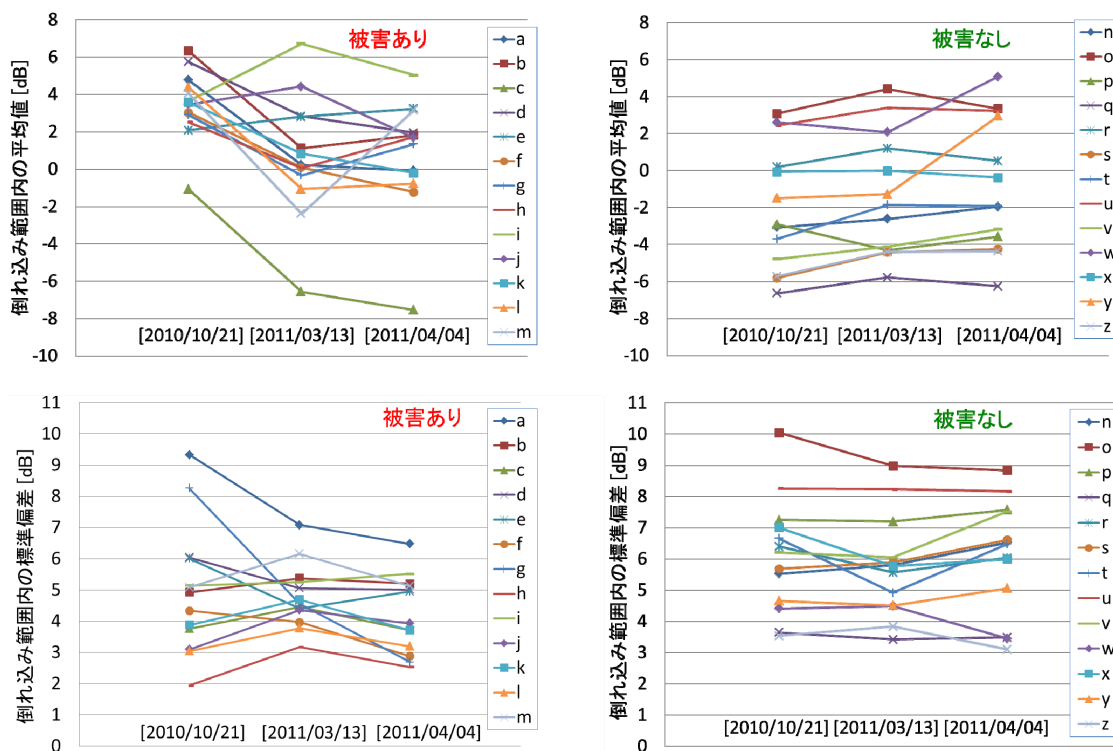


図5 被害・無被害建物の倒れ込み範囲内における後方散乱係数の平均値・標準偏差の時間変化

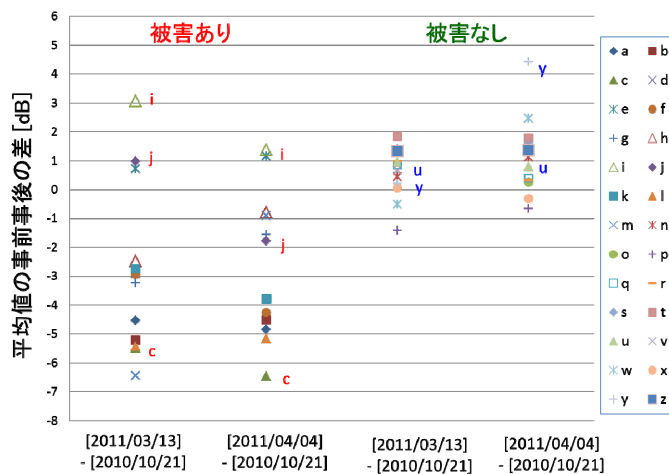


図6 被害・無被害建物の後方散乱係数の平均値の差分：[事後]－[事前]

図5の各建物の倒れ込み範囲内の後方散乱係数の平均値では、被害建物において津波後の平均値が著しく減少する傾向が見られる。一方、無被害建物では、この平均値がほぼ一定の値を示しており、被害の有無による倒れ込み範囲での後方散乱係数の変化傾向に違いが見られる。これは建物側面の損傷によってマイクロ波の反射が弱まり、側面からの反射を表す図3(c)におけるb、cの後方散乱の値が減少した影響によるものと考えられる。標準偏差においては、被害建物の方が無被害建物に比べて値が低いように見えるが、これは側面の被害により、後方散乱の値そのものが低下した影響と思われる。

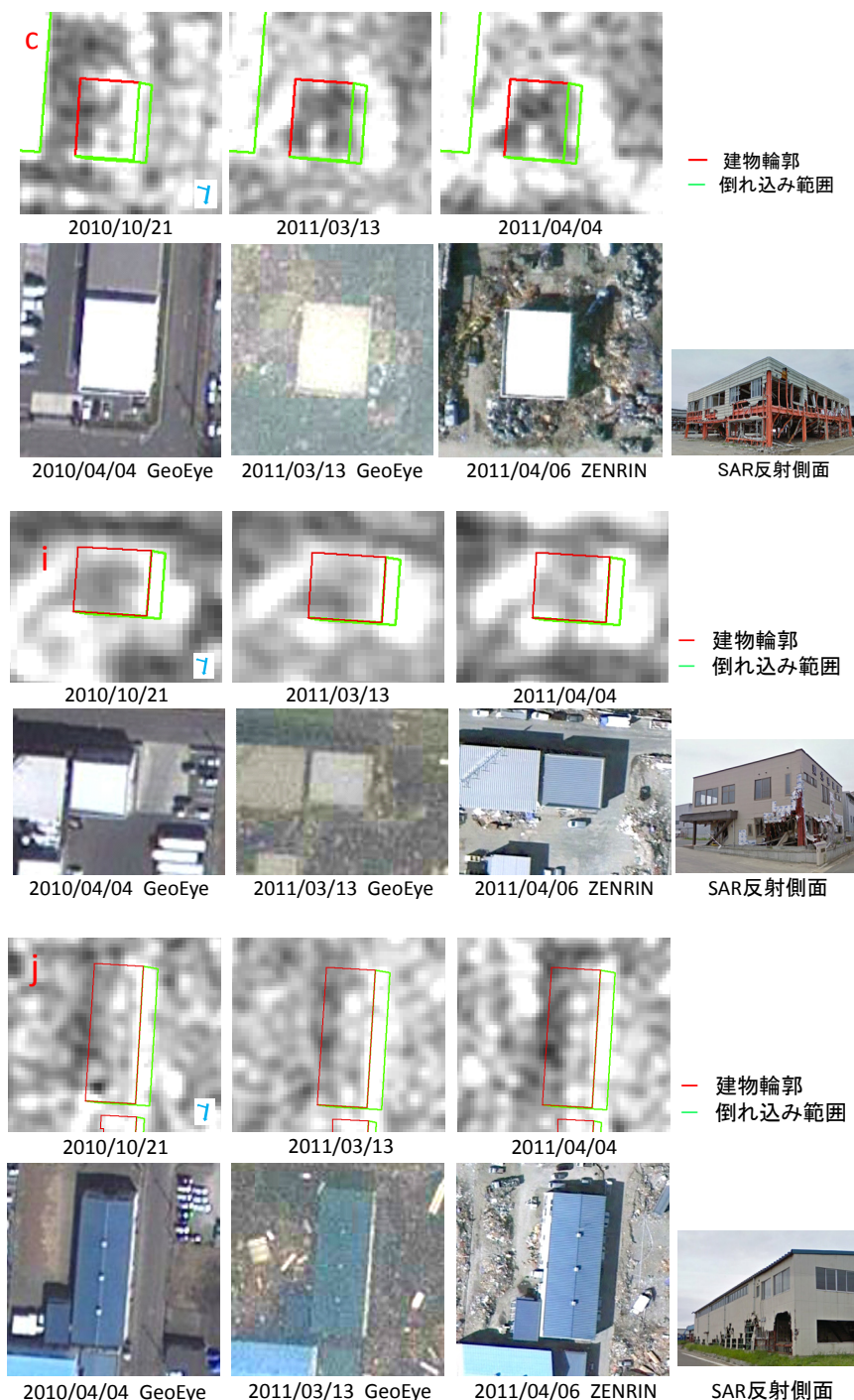


図7 側面に被害を受けた建物の状況（後方散乱係数が低下した建物cと増加した建物i、j；画像は全てGoogleEarthより抽出）



図6において特徴的な被害・無被害建物について、TSX画像とGoogleEarth光学画像、SAR反射に対応する建物側面のストリートビュー画像からその原因を考察する。図7に示す被害建物cでは側壁が完全に損壊しており、このためこの面での反射が大きく低下したと考えられる。一方、建物i、jでは逆に、津波直後に倒れ込み輪郭内の平均値の上昇が見られたが、図7における2011/03/13の光学画像を確認してみると、倒れ込み範囲内に瓦礫の散乱が見られることから、この影響によっての後方散乱係数が上昇したと考えられる。このことは、建物jにおいて瓦礫撤去が観察されている2011/04/04の平均値が2011/03/13の平均値と比べ減少していることから確認できる。建物iに関しては、瓦礫撤去後の2011/04/04の平均値においても、2010/10/21のものと同様に上昇が見られる。これは強い反射を示す鉄骨の露出量が建物jに比べ多いため、倒れ込み範囲内の後方散乱係数の平均値を求める本手法では、本来現れるべき後方散乱の減少が、鉄骨によって相殺されてしまったことが原因として考えられる。なお、鉄骨のような金属材料は導体であるためマイクロ波の入射に対し全反射を起こし、幾何形状による2面コーナー反射によって強い後方散乱を示すことが知られている<sup>34)</sup>。

図8に無被害建物の例を2棟示す。建物uは典型的な無被害建物で、画像からも地震・津波による影響は見られず、後方散乱係数の平均値もほぼ一定のままである。建物yでは2011/04/04において異常な平均値の上昇が見られたが、2011/03/13には大きな変化は見られない。倒れ込み範囲にスペースが存在することから、光学画像からは特定はできないが反射の強い自動車等の存在によるものであると考えられる。

以上より、倒れ込み範囲の状況に左右されるものの、事後・事前の差分を示した図6において、被害ありの建物の21/26が2011/03/13または2011/04/04の事後画像で負の値を示しており、一方、被害なしの建物は逆に22/26が正の値を示していることから、倒れ込み範囲の後方散乱係数の平均値の2時期の差分を求めることで、とくに建物側面における被害の有無を検出できる可能性を示している。これは、主として鉛直方向から撮影される光学衛星画像からは得られない情報であり、斜め入射を特徴とするSAR画像の大きな有用性の1つと考えられる。なお、無被害建物でも大半が後方散乱係数の増加が見られたことは、推測ではあるが復旧活動による車両等の影響と考えられる。

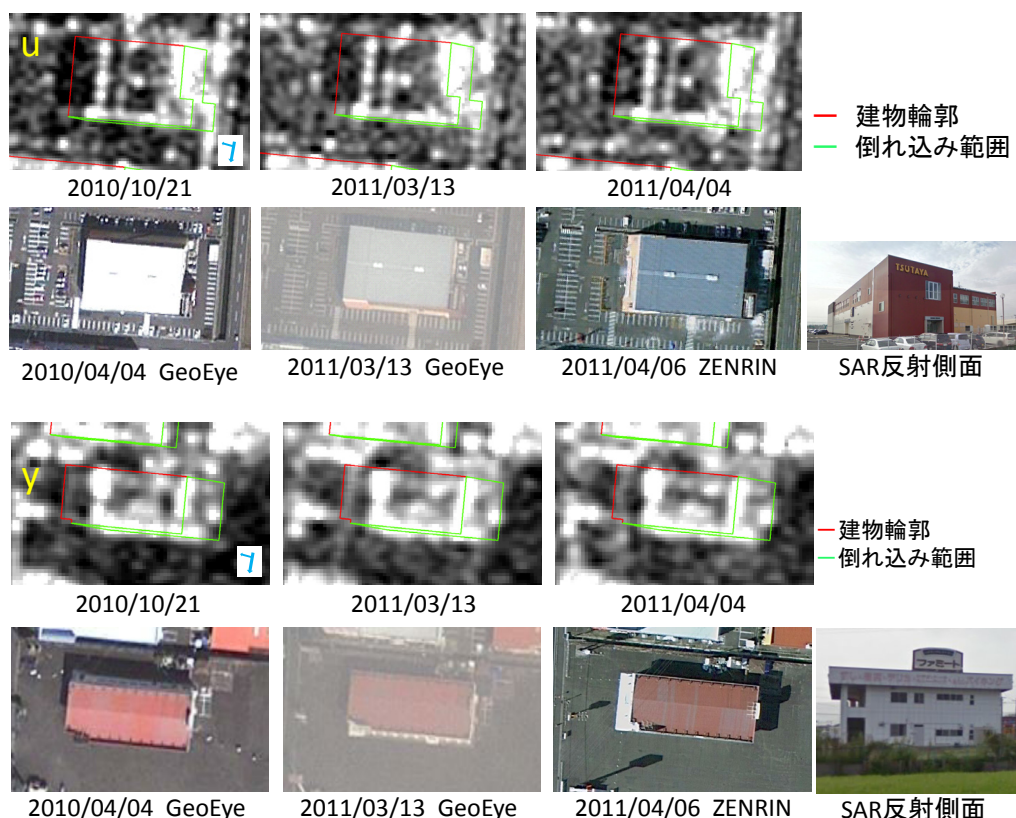


図8 無被害建物の状況（後方散乱係数がほぼ一定の建物uと増加した建物y；  
画像は全てGoogleEarthより抽出）

## 2.4 エラーマトリックスを用いた精度評価

前節の結果より、倒れ込み範囲内の後方散乱係数の平均値の2時期の差分を用いて建物被害の検出を行う。今回は、事後画像と事前画像の差分が負の値を示した（後方散乱が低減した）場合、すなわち0以下の建物を被害ありと判定する。使用データは、前節で用いた2010年10月21日と2011年3月13日のTSX画像（図2）とし、復興支援調査アーカイブで提供されている建物輪郭データ<sup>28)</sup>をもとに、同様の作成方法で倒れ込み輪郭を作成した。仙台塩釜港を対象地域として、前節で用いた建物を除いた計101棟の建物（図9）に対して検討した。今回は復興支援調査アーカイブにおける現地調査結果<sup>28)</sup>と本手法の判定結果を比較した。この現地調査では、建物被害を全壊（流出）、全壊、全壊（一階天井以上浸水）、大規模半壊、半壊（床上浸水）、一部損壊（床下浸水）、被害なしの全7区分に分類している。建物ごとの被害区分は、原則として国土交通省の委託を受けた技術者の現地での外観目視調査によるもので、罹災証明とは必ずしも一致していない<sup>28)</sup>。

本検証では、全壊（流出）判定以外の建物を対象として選び、現地調査結果における大規模半壊以上の被害を本手法での「被害あり」として、エラーマトリックスを用いた精度評価を行う。図9に復興支援調査アーカイブに収められている、現地調査における被害区分図（計101棟）と被害判定に対応する現地写真の例を示す。

図10に各被害区分の建物について、倒れ込み範囲にける後方散乱係数の平均値の津波前後の差分を表す。「全壊」の建物では全て平均値の減少が見られる。しかし、全壊（一階天井以上浸水）において大きなばらつきが出ており、差分の閾値を0とした場合は、半数の建物で平均値が増加している。



図9 精度検証に用いた対象建物と被害区分（計101棟）と現地調査における被害判定例<sup>28)</sup>

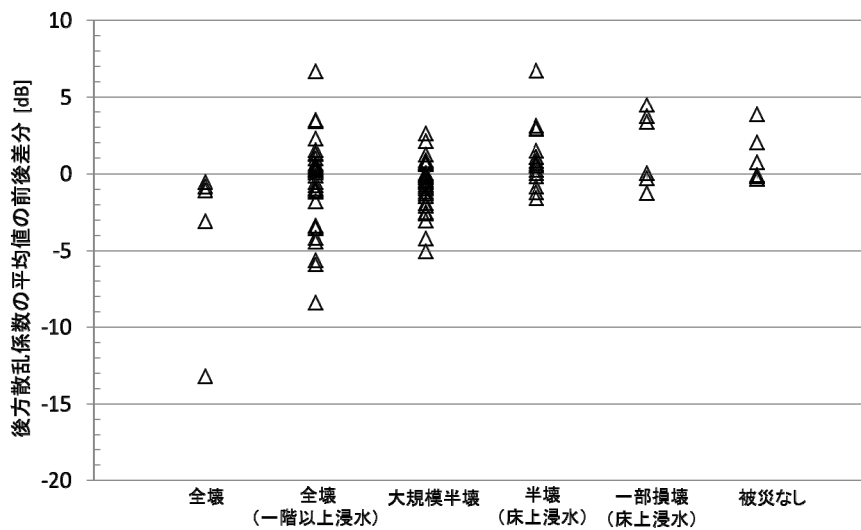


図10 各被害区分の建物に対する後方散乱係数の倒れ込み範囲内の平均値の差分：[事後]－[事前]



後方散乱係数の平均値が減少したものを「被害あり」、増加したものを「被害なし」の2区分で求めたエラーマトリックスを表1に示す。「全壊」区分の建物ではプロデューサ精度、ユーザ精度ともに80%以上の高い値を示しているが、全壊（一階天井以上浸水）の区分の建物ではプロデューサ精度が50%という低い値となった。これは判定基準が一階天井以上浸水のため、外面上の被害が出ていない建物についても、この被害区分となっている可能性があるからといえよう。一方、津波被害を受けた「大規模半壊」の建物では、35棟中26棟が被害ありの区分となった。また、半壊以下の被害区分の精度については、サンプル数が少ないため一概にはいえないが、図3で示したように倒れ込み範囲内の値が側面のみではなく地表面からの反射の値も含んでいるため、自動車や瓦礫など後方散乱の強い物体の存在によって、結果が影響された可能性も考えられる。

以上の結果から、本手法による建物被害の推定は、精度面でやや課題が残るものの、直下視の光学画像では確認することができない建物側面の被害把握を可能にすることを示すことができた。なお、航空写真においては斜め撮影が行われることもあるが、地図への投影が困難であるため、その利用は限定されている。衛星SAR画像を利用することで、多くの地域において建物側面の被害把握が可能となることが期待できる。

表1 復興支援調査アーカイブデータに対するTSX画像による変化抽出結果のエラーマトリックス  
(倒れ込み範囲の後方散乱係数の平均値が低下したものを被害ありとした)

SAR \ 現地調査	被災なし	一部損壊 (床下浸水)	半壊 (床上浸水)	大規模半壊	全壊 (一階天井以上浸水)	全壊	合計	User's Accuracy [%]
被害なし	3	4	13	9	16	0	45	44.4
被害あり	3	2	4	26	16	5	56	83.9
合計	6	6	17	35	32	5	101	
Producer's Accuracy [%]	50.0	66.7	76.5	74.3	50.0	100.0	Overall Accuracy [%]	66.3

### 3. 福島原発事故におけるSAR画像を用いた被害把握

#### 3.1 使用データ

本章の検討には、2011年東北地方太平洋沖地震後に観測された2011年3月13日、2011年9月5日の2時期のTSX画像を用いた。いずれも下降軌道からHH偏波でStripMapモードにより撮影されたものである。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、観測角度はともに37.3°である。使用画像は、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(図11)。各画像を後方散乱係数 $\sigma^0$ へと変換した後<sup>30)</sup>、Leeフィルタ<sup>31)</sup>を3×3のウィンドウで適用しスペクルノイズを低減した。本章で用いた画像は、ともに地震後のものであるため、前章で行った地殻変動を打ち消すための位置補正は行わない。また、現地の状況を把握するため、2011/09/16に撮影された高解像度光学センサ衛星GeoEye-1により取得された画像をSAR画像との比較に用いた(図11)。

ここでは福島第一原子力発電所の1~4号機について検討を行い、両画像の撮影時差内に爆発事故のあった3、4号機建屋と外見上、建屋被害のない2号機建屋を比較し、その違いについて考察する。また1号機ではすでに爆発事故が発生した後であるため、事後対応を記した東京電力の資料<sup>35)</sup>と比較しながら、SAR画像上の変化を考察する。

#### 3.2 倒れ込み範囲とレーダー影における強度平均値の変化による被害把握

原発建屋の被害把握では、原発の複雑な構造上、倒れ込み範囲に強い後方散乱を示す金属製の配管設備が密集し明確な差が出ないことも考えられたため、地表面の状態に左右されないレーダー影を用いた変化と併せて被害把握を行う。倒れ込み現象やレーダー影が画像上に現れることを利用し、経済産業省Webページ<sup>36)</sup>で公開されている建屋断面図の高さをもとに式(1)、式(2)から倒れ込み輪郭とレーダー影輪郭をそれぞれ作成し、図12にそれらを示す。

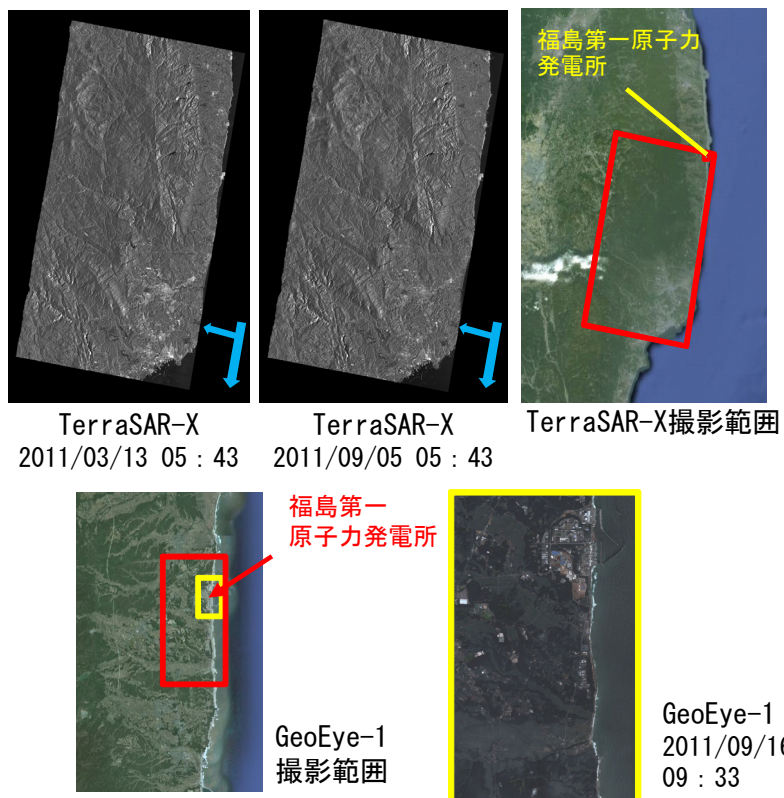


図 11 使用した TerraSAR-X と GeoEye-1 画像の範囲とその諸元

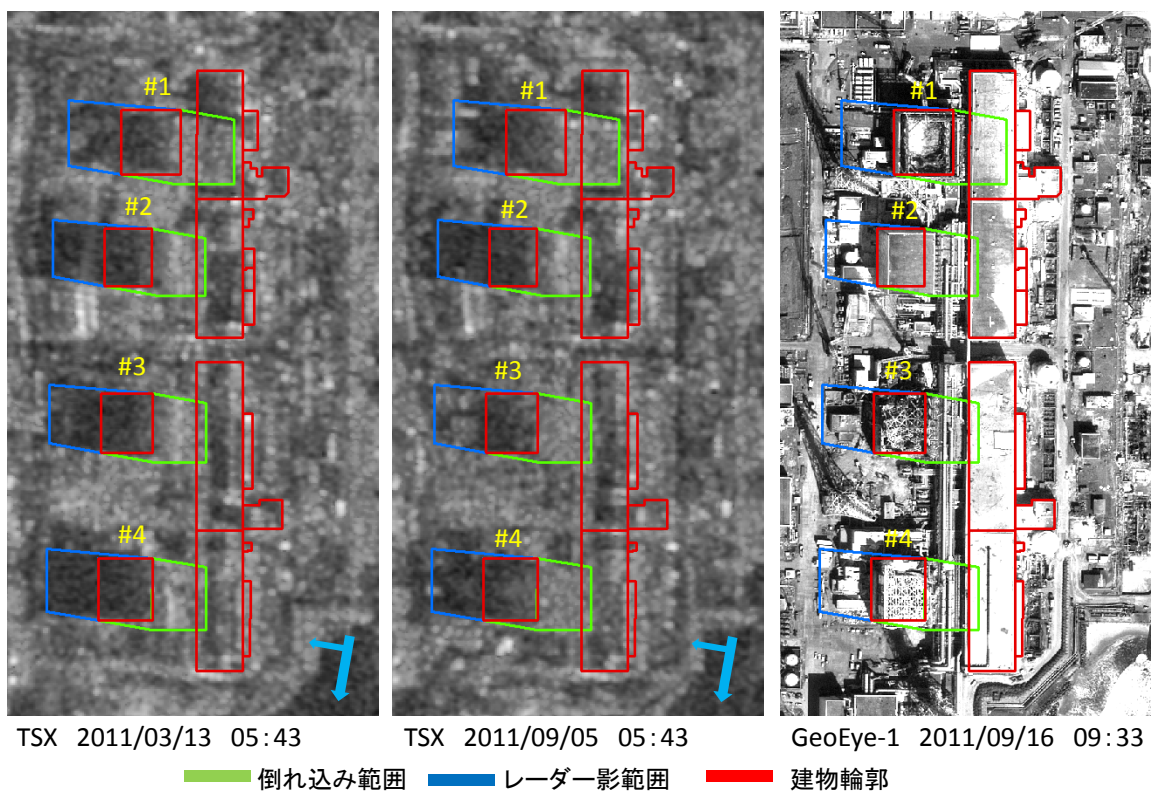


図 12 各原発建屋についての倒れ込み輪郭とレーダー影の輪郭（北から 1、2、3、4 号機の順）

以上の方法によって求めた倒れ込み範囲（図3のL）及び建屋接地部を除くレーダー影範囲（図3のL）における後方散乱係数の平均値とその2時期の差分値を表2、3にそれぞれ示す。倒れ込み範囲における後方散乱係数は、4号機建屋で平均値の減少が見られるが、3号機建屋では大きな値の変化は確認できなかった。これは前述したように、倒れ込み範囲に配管設備が密集し明確な差が出にくいことが原因として考えられる。また、東京電力資料の写真（図14）を確認すると、3号機では4号機に比べ爆発による鉄骨の露出量が多く、倒れ込み範囲内の後方散乱係数の平均値を求める本手法では、本来現れるべき散乱強度の減少が、強い散乱強度を示す鉄骨によって相殺されてしまったことも原因の1つとして考えられる。

表2 各原発建屋における倒れ込み範囲の後方散乱係数の変化

	撮影日	平均値 [dB]	平均値の差 [dB] (事後—事前)		撮影日	平均値 [dB]	平均値の差 [dB] (事後—事前)
1号機	2011/3/13	-2.56		2号機	2011/3/13	-0.20	
	2011/9/5	1.33	3.88		2011/9/5	0.99	1.19
3号機	2011/3/13	-0.58		4号機	2011/3/13	-0.12	
	2011/9/5	-0.34	0.24		2011/9/5	-1.06	-0.94

表3 各原発建屋におけるレーダー影範囲の後方散乱係数の変化

	撮影日	平均値 [dB]	平均値の差 [dB] (事後—事前)		撮影日	平均値 [dB]	平均値の差 [dB] (事後—事前)
1号機	2011/3/13	-10.97		2号機	2011/3/13	-15.58	
	2011/9/5	-8.52	2.44		2011/9/5	-14.55	1.04
3号機	2011/3/13	-16.35		4号機	2011/3/13	-16.35	
	2011/9/5	-12.98	3.37		2011/9/5	-13.10	3.25



図13 2011年9月15日の各原子炉建屋の状況（東京電力資料<sup>35)</sup>）



この鉄骨による平均値への影響は、1号機の値が上昇している原因としても考えられる。東電資料を確認したところ、1号機では事後画像として用いた2011年9月5日の時点で、建屋カバーの設置作業が進行中であり、その際に鉄骨の骨組みが組み上げられていることがわかった<sup>35)</sup> (図13)。

一方、レーダー影を用いた後方散乱係数の変化では、3、4号機ともに平均値の上昇を捉えることができた。通常、レーダー影範囲内では、後方散乱係数が非常に小さいマイナスの値を示すため、変化があった場合、差の値がプラスを示す。これは、爆発によって建屋高さが変わり、レーダー影の範囲が小さくなったためであると考えられる。1号機についても、同様にレーダー影範囲内の後方散乱係数の上昇がみられる。これは2011年3月13日の画像は爆発事故の後であるため、レーダー影の長さが、既に断面図から作成した輪郭よりも小さくなっているが原因として考えられる。このことによって、建屋カバーの設置の重機や機材などが輪郭内の値として含まれてしまい、平均値が上昇したと考えられる。

以上よりレーダー影を用いた手法によって、爆発事故による建屋高さの変化を捉えることが可能であることを示すことができたと考える。また、本事例では、倒れ込み範囲において、爆発による変化や機器・資材の状況が複雑であり、かつ事後画像が半年後のものであったことから、様々な変化が含まれて、後方散乱の増減だけでは、建屋損傷を充分捉える事は出来なかった。しかし、より高い撮影頻度でSAR画像が得られていれば、その間の変化を把握できた可能性はある。

#### 4. まとめと今後の展望

本研究では、高解像度SAR衛星で得られた強度画像を用い、画像上の建物の倒れ込み領域とレーダー影領域の後方散乱係数の変化から、構造物の形状変化を抽出し被害を把握することを試みた。本手法を検証するため、2011年東北地方太平洋沖地震により津波被害を受けた仙台塩釜港に位置する建物と、建屋の爆発事故のあった福島第一原子力発電所に対し本手法を用いて有用性の検討を行った。

まず、仙台塩釜港の周辺地域より、光学センサ画像と現地写真に基づいて、側面に被害を受けた建物13棟と無被害の建物13棟を抽出し、被害の有無によるSAR画像上の後方散乱係数の変化を検証した。その結果、建物の倒れ込み範囲内の後方散乱係数の平均値の2時期の差分を求めることで、建物側面における被害の有無を検出できる可能性が示された。この結果から、仙台塩釜港に立地する計101棟の建物について、倒れ込み範囲内の後方散乱係数の2時期差分と現地調査結果とを比較し、本手法の適用性の精度検証を行った。差分が負の値を示した（後方散乱係数が低減した）場合は被害ありと判定し、エラーマトリックスを用いて精度を求めた結果、総合精度が66.3%とやや課題が残るものの、直下視の光学画像からでは確認することができない建物側面の被害把握が可能であることを示した。

福島第一原子力発電所では、2時期のTSX画像を用いて、倒れ込み範囲とレーダー影範囲の後方散乱係数の平均値の変化から、爆発事故による原子炉建屋の損傷把握を行った。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ものの、レーダー影範囲内の後方散乱係数の2時期差分を求めることで、爆発事故による建屋の損壊（レーダー影の縮小）を把握することができた。

本研究の例題はいずれも比較的広い場所に立地する大きな建物を対象としているが、建物密集地域にある小さな建物については、マイクロ波の反射が複雑になるとともに、画像の解像度の制約もあって本手法の適用に限界があると考えられる。今後は、倒れ込み範囲やレーダー影範囲の後方散乱係数を画像解析で自動的に求めることにより、作業時間の短縮を図るとともに、検討対象とする建物数を増やすことで、実用性と精度の向上を図っていきたい。また、倒れ込み範囲を用いた手法では、瓦礫や車などの障害物により誤判定が発生することが明らかとなったため、建物の周辺環境に応じた評価法の導入も考えられ、今後より汎用性の高い手法の確立を目指していきたい。

#### 参考文献

- 1) Rathje, E., and Adams, B.J.: The Role of Remote Sensing in Earthquake Science and Engineering, Opportunities and Challenges, *Earthquake Spectra*, 24(2), 2008, pp. 471–492.
- 2) Eguchi, R.T., Huyck, C., Ghosh, S., Adams, B.J.: The Application of Remote Sensing Technologies for Disaster Management, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008, CD-ROM.

- 3) 山崎文雄：防災におけるリモートセンシング技術利用の最新動向、土木学会第10回地震災害マネジメントセミナー：地震災害対応におけるリモートセンシング・テクノロジーの活用、ISBN978-4-8106-0686-7, 2009, pp. 1-12.
- 4) 高分解能衛星リモートセンシング研究会：東北地方太平洋沖地震・津波災害の高分解能衛星リモートセンシング、日本リモートセンシング学会誌、Vol. 31, No. 3, 2011, pp. 344-367.
- 5) 高橋陪夫、島田政信、宮城洋介、大木真人、河野宣幸、白石知弘、本岡毅：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, 2011, pp.198-205.
- 6) Yamazaki, F., Yano, Y., Matsuoka, M.: Visual Damage Interpretation of Buildings in Bam City Using QuickBird Images Following the 2003 Bam, Iran, Earthquake, Earthquake Spectra, Vol. 21, No. S1, 2005, pp. S329-S336.
- 7) 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観た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, 2006, pp. 92-95.
- 8) 三浦弘之、翠川三郎、Soh Hui Chen: 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、Vol. 12, No. 6(特集号), 2012, pp. 2-20.
- 9) Ghosh, S., Huyck, C, K., Greene, M., Gill, S, P., Bevington, J., Svekla, W., DesRoches, R., Onald, R., Eguchi, T: Crowdsourcing for Rapid Damage Assessment: The Global Earth Observation Catastrophe Assessment Network (GEO-CAN), Earthquake Spectra, Vol. 27, No. S1, 2011, pp. S179-S198.
- 10) 岩崎洋志、リュウ・ウエン、山崎文雄：光学センサ画像における日影長さと SAR 強度画像における倒れ込み量に基づく建物高さ地震による倒壊の検出、日本地震工学会論文集、Vol. 12, No. 6(特集号), 2012, pp. 33-45.
- 11) Meslem, A., Yamazaki, F., Maruyama, Y.: Accurate evaluation of building damage in the 2003 Boumerdes, Algeria earthquake from QuickBird satellite images, Journal of Earthquake and Tsunami, Vol. 5, No. 1, 2011, pp.1-18.
- 12) 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、Vol. 31, No. 3, 2011, pp. 334-337.
- 13) 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、Vol. 12, No. 6(特集号), 2012, pp. 63-72.
- 14) Shimakage, J., Yamazaki, F.: Detection of flooded areas following the 2011 Thailand floods using ASTER images, Proc. 33rd Asian Conference on Remote Sensing, Pattaya Beach, Thailand, CD-ROM, 2012, 8p.
- 15) 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. 55-61.
- 16) 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、Vol. 10, No. 3, 2010, pp.73-86.
- 17) 松岡昌志、Miguel Estrada：2007 年ペルー地震の被災地を観測した ALOS/PALSAR 画像による建物被害推定モデルの構築、日本地震工学会論文集、Vol. 12, No. 6(特集号), 2012, pp.36-49.
- 18) 松岡昌志、堀江啓、大倉博：人工衛星 SAR 画像による被害地域検出手法の 2004 年新潟県中越地震への適用と高度化、日本建築学会構造系論文集、No.617, 2007, pp.193-200.
- 19) 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(特集号), 2010, pp. 1-11.
- 20) Yague-Martinez, N., Eineder, M., Cong, X.Y., and Minet, C.: Ground Displacement Measurement by TerraSAR-X Image Correlation: The 2011 Tohoku-Oki Earthquake, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 9, No. 4, 2012, pp. 539-543.
- 21) リュウ・ウエン、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、Vol. 12, No. 4(特集号), 2012, pp. 3-13.
- 22) リュウ・ウエン、山崎文雄、郷右近英臣、越村俊一：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、日本地震工学会論文集、Vol. 12, No. 6(特集号), 2012, pp. 73-85.

- 23) Miura, H. and Midorikawa, S.: Preliminary Analysis for Building Damage Detection from High-Resolution SAR Images of the 2010 Haiti Earthquake, Joint Conference Proceedings of 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 4th Asia Conference on Earthquake Engineering, Paper No.01-212, 2012.
- 24) Uprety, P., Yamazaki, F., Detection of Building Damage in the 2010 Haiti Earthquake using High-Resolution SAR Intensity Images, Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol. 12, No. 6 (Special Issue), 2012, pp.21-35.
- 25) Mori, N., Takahashi, T. and The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group: Nationwide survey of the 2011 Tohoku earthquake tsunami, Coastal Engineering Journal, Vol. 54, Issue 1, 2012, pp.1-27.
- 26) 消防庁災害対策本部:平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)について(第147報)、2013.
- 27) GoogleEarth: <http://www.google.co.jp/earth/index.html>
- 28) 復興支援調査アーカイブ : <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>
- 29) Liu, W., Yamazaki, F.: Detection of Crustal Movement from TerraSAR-X intensity images for the 2011 Tohoku, Japan Earthquake, Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 10, No. 1, pp. 199-203, 2013.
- 30) Infoterra: Radiometric Calibration of TerraSAR-X Data:  
[http://infoterra.de/fileadmin/Verzeichnisordner/Dokumente/2\\_AboutUs/0207\\_FormalDocs/TSXX-ITD-TN-0049-radiometric\\_calculations\\_I1.00.pdf](http://infoterra.de/fileadmin/Verzeichnisordner/Dokumente/2_AboutUs/0207_FormalDocs/TSXX-ITD-TN-0049-radiometric_calculations_I1.00.pdf)
- 31) Lee, J. S, Jurkevich, L, Dewaele, P, Wambacq P., and Oosterlinck, A.: Speckle filtering of synthetic aperture radar images, A review, Remote Sensing Reviews, Vol. 8, No. 4, 1994, pp.313-340.
- 32) 国土地理院 HP : <http://www.gsi.go.jp/chibankansi/chikakukansi40005.html>
- 33) 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.
- 34) 飯坂譲二監修、日本写真測量学会編：第2章地表とマイクロ波との相互作用、合成開口レーダ画像ハンドブック、朝倉書店、1998.
- 35) 東京電力株式会社：東日本大震災後の福島第一・第二原子力発電所の状況、  
<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/index-j.html>
- 36) 経済産業省 : <http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/backdrop/pdf/app-chap04-3.pdf>

(受理 : 2013年 4月8日)  
(掲載決定 : 2013年 8月2日)



# Detection of damage to building side-walls using high-resolution satellite SAR images

IWASAKI Yoji <sup>1)</sup>, YAMAZAKI Fumio <sup>2)</sup>, LIU Wen <sup>3)</sup>,  
NONAKA Takashi <sup>4)</sup>, SASAGAWA Tadashi <sup>4)</sup>

1) Non-member, Chiba Prefectural Government; former Graduate Student, Chiba University, M. Eng.

2) Member, Professor, Chiba University, Dr. Eng.

3) Member, JSPS Research Fellow, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.

4) Non-member, Satellite Business Division, PASCO Corporation.

## ABSTRACT

Optical satellite images are widely used to detect building damage due natural disasters in the world. However, since optical satellites images are mostly acquired from the vertical direction, they can observe only the roofs of buildings. Building damage such as to side-walls or mid-story collapse is often overlooked because the upper surfaces of buildings do not change too much in the vertical view. This paper proposes the method to detect this kind of building damage from the change in layover effects and radar shadow in SAR intensity images. Multi-temporal TerraSAR-X images covering Sendai-Shiogama Port and Fukushima No. 1 Nuclear Power Plant were employed to detect building damages due to tsunamis and hydrogen explosions after the 2011 Tohoku, Japan earthquake. The difference in backscattering coefficients before and after the event in layover and radar-shadow areas could show the damages to side-walls of buildings located in these sites.

*Key Words: 2011 Tohoku Earthquake, building collapse, Synthetic Aperture Radar, Layover, Radar Shadow*