

合成開口レーダーを利用した津波被害の面的把握

Detecting Tsunami Affected Area using Satellite SAR Imagery

越村俊一¹・松岡昌志²

Shunichi KOSHIMURA and Masashi MATSUOKA

Using a capability of SAR(Synthetic Aperture Radar) image analysis, the authors develop a method for mapping tsunami affected area, focusing on the relationship the backscattering features between pre and post-event SAR images. The method was applied to Aomae district in Okushiri island which was the most devastated by the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake tsunami (Okushiri tsunami) to identify the severity of structural damage with a fragility curve of pre-post SAR image features and probability of structural destruction.

1. はじめに

災害直後の土地被覆状況の変化や構造物被害の面的な把握にリモートセンシング技術が活用されている。最近では、QuickBird, IKONOS, WorldViewといった高分解能の光学衛星画像を用いた被害把握が行われているが(たとえば萱場ら, 2008), 観測時期(昼夜)や天候(雲)の影響により必ずしも成功するとは限らない。一方, 合成開口レーダー(SAR)は光学センサとは異なり, 昼夜を問わずかつ雲を透過して地表の状況を観測できるため, 災害直後の緊急観測が成功する確率は光学センサよりも格段に高い。また, 平常時の観測アーカイブも充実しており, 災害前後の画像の変化を調べることにより被害を把握することが可能である。一方, SARにより観測されるのは地表の凹凸などによるマイクロ波の散乱強度(後方散乱係数)であり, 特に津波被害の把握については調査事例が少ないことから, 災害前後の後方散乱係数の変化と実際に発生した倒壊建物等の被害をどのように関連づけるかが課題であった。本研究では, SAR画像による津波被災地の早期把握を目指し, 津波災害前後の画像処理から建物被害程度を推定するための技術を開発する。

具体的には, 地震被害を対象とした人工衛星SAR画像解析による建物被害抽出の手法を拡張し, 北海道南西沖地震津波の被災地であった奥尻島・青苗地区(5区)におけるSAR観測画像を用いて建物被害地域の抽出を試みる。その際, 航空写真の被害判読結果(建物一棟毎の被害有無)とSAR画像を関連づけ, 津波前後2時期のSAR画像の変化特性と建物被害率の関係式を新たに得ることで津波被害抽出精度の向上を図る。

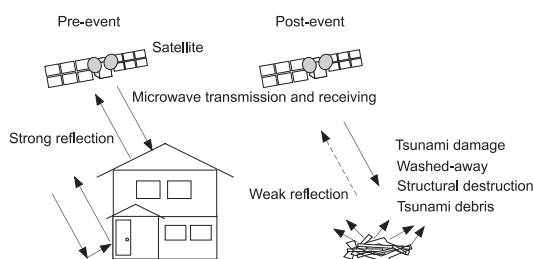


図-1 人工衛星SARによる建物被害観測の模式図

2. 人工衛星SAR画像による地震被害の抽出

ここでは, 人工衛星SAR画像を利用した建物被害把握の手法について, Matsuoka and Nojima (2010) による解析手法を概説する。

SARは, 航空機や人工衛星などのプラットフォームの進行方向に対して横向きかつ斜め下方の地表に向けて照射したマイクロ波の後方散乱強度と位相を観測する。光学センサが地表での可視光・赤外域の電磁波の反射・放射特性を受動的に観測するのに対し, SAR自体が能動的にマイクロ波を照射して観測を行うのが最も大きな観測方法の相違点である。マイクロ波の後方散乱強度の大きさは, その波長や地表への照射角度・入射角, 地表面の凹凸のスケールや形状, 誘電特性などの影響を大きく受ける。SARによる建物被害観測の概念を図-1に示す。

イベント(災害)の発生による地表の変化を考えた場合, 建物を含む市街地に照射されたマイクロ波は地表と構造物の間で2回(多重)反射する。これはカージナル効果と呼ばれ, 一般に, 都市域のSAR画像にはマイクロ波の照射方向に直行する建物に対して強い輝度を示す傾向がある。すなわち, 建物被害が無い災害前の市街地SAR画像から得られる後方散乱強度は大きくなる, 一方, 地震や津波により建物が倒壊したり流失・破壊された場

1 正会員 博(工) 東北大学准教授 大学院工学研究科
2 非会員 博(工) 産業技術総合研究所主任研究員

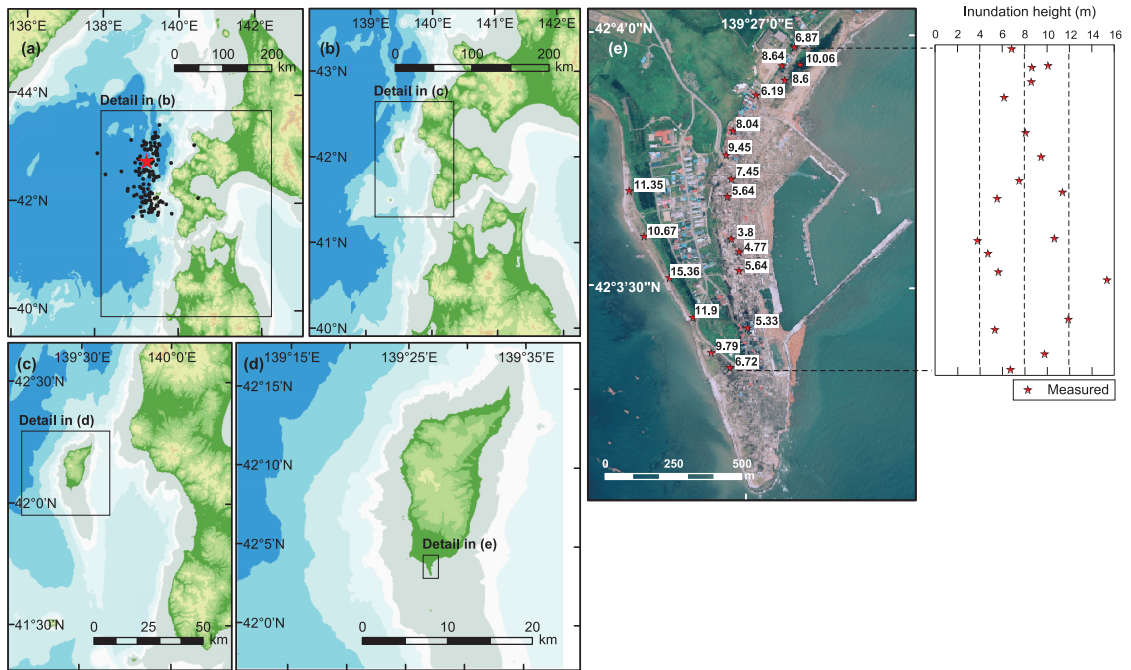


図-2 (a-d)本研究の対象領域（奥尻島青苗5区）と（e）測定された津波遡上高（首藤，1994）．図中の数字は遡上高の想定値（m）

表-1 航空写真の目視判読による奥尻島青苗地区の家屋被害

被害分類	判読基準	棟数
a) 流失・全壊・大破	浸水域内で流失か屋根の形状に変化が認められる	417
b) 流失・全壊・焼失・大破	浸水・火災域内で流失か屋根の形状に変化が認められる	123
c) 焼失・全壊・大破	火災域内で焼失か屋根の形状に変化が認められる	75
d) 全壊・大破	津波浸水域・火災域に含まれないが屋根の形状に変化が認められる	11
e) 中破以下	屋根の形状に変化が認められない	143

合には、その場所に放射されたマイクロ波は、表面反射や体積散乱等により反射波として衛星に戻る成分が小さくなる。この変化を捉えることがSAR画像解析による建物被害抽出の基本的な考え方である。

Matsuoka and Nojima (2010) は、地震前後のSAR画像を用いた建物被害検出手法を以下のように提案した。

まず、イベント発生前後の2時期の観測画像を用意し、両画像のピクセル位置をアフィン変換等により正確に合わせる。その後、SAR画像特有のノイズ（スペckルノイズ）を低減するためのフィルタ処理を行って平滑化し、イベント前後の画像から後方散乱強度の差分 d と相関係数 r を式（1）、（2）により計算する。

$$d = 10 \log \hat{I}_{ai} - 10 \log \hat{I}_{bi} \dots\dots\dots (1)$$

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N I_{ai} I_{bi} - \sum_{i=1}^N I_{ai} \sum_{i=1}^N I_{bi}}{\sqrt{\left(N \sum_{i=1}^N I_{ai}^2 - \left(\sum_{i=1}^N I_{ai} \right)^2 \right) \left(N \sum_{i=1}^N I_{bi}^2 - \left(\sum_{i=1}^N I_{bi} \right)^2 \right)}} \quad (2)$$

N は計算するウィンドウ内のピクセル数（ここでは $N=13 \times 13=169$ ）、 I_{bi} 、 I_{ai} はそれぞれイベント前後の画像の i 番目におけるピクセル値、 $\hat{I}_{bi}$ 、 $\hat{I}_{ai}$ はイベント前後の i 番目のピクセルの周囲 13×13 の平均値である。地震による建物被害は、 d と r を説明変数とした合成変量（判別得点） Z_{Rj} （式（3））と1995年兵庫県南部地震の建物被害の統計情報を関連づけて検出する。

$$Z_{Rj} = -1.277d - 2.729r \dots\dots\dots (3)$$

以下では、判別得点 Z_{Rj} と実際の津波被害との関連づけを行う。具体的には、奥尻島・青苗地区の1993年北海道南西沖地震被災前後の航空写真を用いて家屋被害の判読



図-3 航空写真の判読による奥尻島青苗地区の家屋被害の分類 (図中のラインはShuto (2007) で報告された津波浸水域と火災域)

を行い、これを実被害データとして用いる。

3. 航空写真による家屋被害判読

対象領域は、1993年7月12日北海道南西沖地震津波により壊滅的な被害が報告された奥尻島青苗地区である(図-2)。ここでは1990年10月29日と1993年7月14日撮影の2枚の写真を用いて、青苗地区769棟の家屋被害判読を実施した。具体的な手順を以下に示す。

1. 航空写真のオルソ化：被災前後の2枚の航空写真をスキャナでデジタル化した後にオルソ化する。航空写真は1990年10月29日(三和航測株式会社撮影)と1993年7月14日(国際航業株式会社撮影)の2枚を利用した。
2. 建物インベントリの作成：被災前の建物のポイントデータを作成する。
3. 被害判読：被災前後の建物の屋根の形状変化とShuto (2007) による津波被災地図(浸水域、火災域を示したもの)を参考にしながら建物データに被害属性を付与する。

なお、被害判読結果は表-1に示す様に5通りに分類し、被害の有無は屋根の形状変化に着目して判断した。ここでいう屋根の形状変化とは、被災前後の航空写真の比較

において、屋根が消失(流失あるいは焼失)、または部分的に欠損していた場合には被害有(Destroyed)とした。すなわち、被害有の場合には津波による流失・全壊・大破・および火災による焼失のいずれかに相当することになる。一方、中破以下の軽微な被害状況を航空写真からは判読することは難しい。既往の現地調査結果をみても、悉皆的に家屋被害状況を調査した事例が無いため、本研究では「中破」以下(Survived)として分類することにした。

家屋被害分類の空間分布を図-3に示す。被害棟数の内訳は表-1に示す通り、(a)津波による破壊・流失417件、(b)津波および火災による焼失・流失123件、(c)火災による焼失75件、(d)破壊要因が特定できない家屋11件、(e)大破以下(屋根の形状に変化が認められない)は143件であった。ここで重要なのは被害分類bとcの解釈である。特にbは浸水域と火災域とが重なる領域にあるため、津波のみによって破壊・流失したか、津波により部分的に破壊された後に延焼火災により焼失したか、津波には耐えたが延焼火災によって焼失した、という3通りの解釈が成り立つ。一方、cの被害(火災域で見られた家屋被害)は津波の浸水が認められないため、火災によるものであることは明らかである。bとcの被害棟数

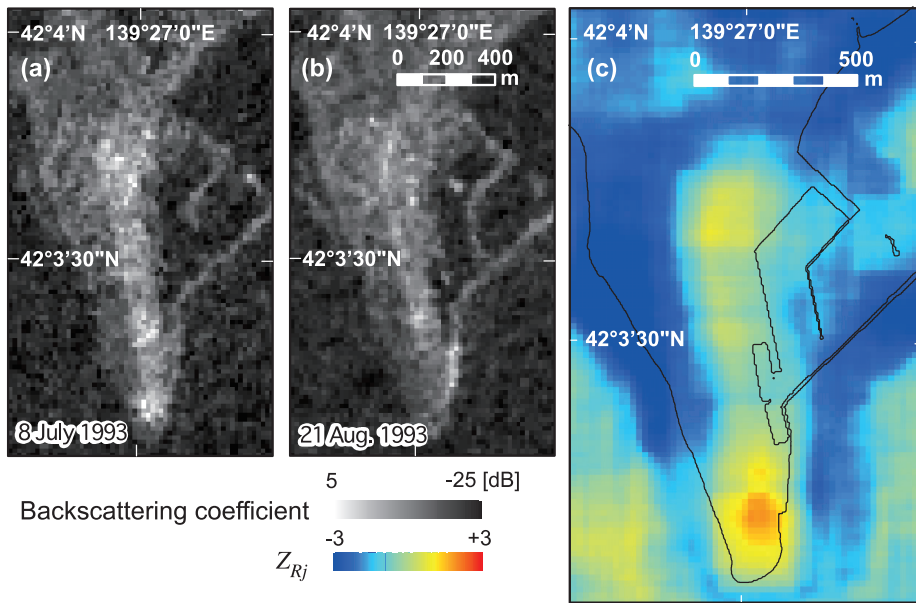


図-4 (a, b) 1993年北海道南西沖地震津波前後の奥尻島青苗地区のSAR画像（後方散乱係数）と (c) Z_{Rj}

の合計は198棟であり、室崎（1994）が報告した奥尻大火の焼損棟数計189件ともほぼ一致する。

4. SAR画像と実被害との関連づけ

ここでは、JERS（Japanese Earth Resources Satellite）が1993年7月8日（津波前）と8月21日（津波後）に観測した2枚のSAR画像を解析に用いる（図-4(a, b)）。JERSの人工衛星SARの諸元を表-2に示す。得られた画像から式（3）で Z_{Rj} を求め（図-4(c)）、図-3の建物被害分布と Z_{Rj} の空間的な関連づけを行い、 Z_{Rj} に対する家屋被害程度（家屋破壊率 P_D ）の判別基準を策定する。具体的な手順を以下に列挙する。

1. 建物一棟毎の被害判読結果とそれに対応する地点の Z_{Rj} 値のデータセットを作成し、 Z_{Rj} の昇順にソートする。
2. 被害率算定のための母数を決定する。ここでは、表-1の被害判読結果a-dまでを「破壊」、eを「生存」とする。上記データセットから、50棟ずつをグルーピングして家屋破壊率 P_D を求める。
3. 各グループにおいて求めた家屋破壊率 P_D と Z_{Rj} 値のメディアン値の関係をj得る。この関係から Z_{Rj} に対する P_D の回帰式（フラジリティ関数）を求める。なお回帰式は正規分布を仮定し、村尾・山崎（2000）の方法に倣い最小二乗法による回帰分析から被害関数を求める。

上記手順により得られた Z_{Rj} と P_D の関係式を図-5に示す。図の●は、SAR画像の Z_{Rj} と航空写真により被害判読

表-2 JERSの人工衛星SARの諸元

諸 元	JERS-1
運用期間	1992年2月11日～1998年10月12日
周波数(MHz)	1275 (Lバンド)
波 長(cm)	23.5
偏 波	HH
走査幅(km)	75
分解能(m)	18
軌道周期(min.)	96
回帰日数(day)	44
軌道高度(km)	570

結果を関連づけた結果であり、実線はその回帰式である。その関数は式（4）のように得られた。

$$P_D(x) = \Phi\left[\frac{(x - \mu)}{\sigma}\right] \cdots \cdots \cdots (4)$$

得られた回帰パラメータは平均 $\mu=-1.53$ 、標準偏差 $\sigma=1.16$ 、 $R^2=0.73$ である。この関係から、SAR画像解析による判別スコア Z_{Rj} が-2.5以上になると家屋破壊率は急激に増加し、 $Z_{Rj}=1$ で殆どの家屋が破壊されることが分かる。すなわち、津波災害前後のSAR画像解析による Z_{Rj} と家屋破壊率の回帰式を利用して判別基準とすることで、SAR画像を家屋被害程度に応じて分類できる。

図-6に示すのは、図-5から家屋被害率を4段階に分類して被災度を表示した結果である。災害発生直後にSARによる緊急観測を行うことができれば、現地の情報を待たずとも津波被災地の被害程度を面的に把握することが可能であり、被災地救援を展開すべき地域や詳細な被害調査を行うべき地域を特定することができる。

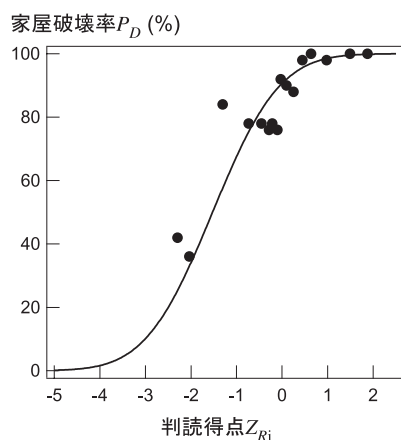


図-5 津波前後のSAR画像から得られた判読得点 Z_{Rj} と建物破壊率の関係

5. 結論

本研究で得られた結果を以下に列挙する。

1993年北海道南西沖地震津波の被災地において得られたSAR画像の解析から、家屋破壊率に対応した被災度の空間分布を把握するための手法を提案した。

奥尻島青苗地区における家屋769棟を対象とした航空写真による被害判読の結果、津波による破壊・流失417件、津波および火災による焼失・流失123件、火災による焼失75件、破壊要因が特定できない家屋11件、大破以下（屋根の形状に変化が認められない）は143件であった。

航空写真による家屋被害判読結果と被災前後のSAR画像解析による判別スコア Z_{Rj} を関連づけた結果、家屋破壊率と Z_{Rj} の関係は正規分布関数で回帰できることが分かった。

Z_{Rj} と家屋破壊率の回帰式を利用して判別基準とすることで、SAR画像を家屋被害程度に応じて分類できることが分かった。津波災害発生直後にSARによる緊急観測を実施し分析することで、被災地外から能動的に津波被災地の被害程度を面的に把握することが可能であり、被災地救援を展開すべき地域や詳細な被害調査を行うべき地域を特定することができる。

謝辞：本研究の一部は平成20年度産業技術研究助成事業（代表：越村俊一，プロジェクトID：08E52010a）の補助を受けて実施された。ここに記して謝意を表する。

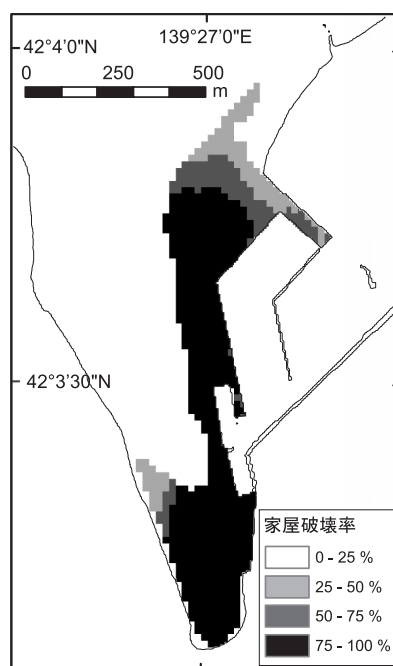


図-6 SAR画像解析と建物破壊基準により得られた津波被災度把握結果

参考文献

- 萱場真太郎・越村俊一・村嶋陽一（2008）：高解像度衛星画像を利用した津波被害の把握手法に関する研究，土木学会海岸工学論文集，第55巻，pp.1456-1460.
- 首藤伸夫（1994）：1993年北海道南西沖地震津波の痕跡高，東北大学津波工学研究報告，第11号，第2編調査資料，pp.1-120.
- 村尾 修・山崎文雄（2000）：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数，日本建築学会構造系論文集，第527号，pp.189-196.
- 室崎益輝（1994）：1993年北海道南西沖地震における奥尻大火，文部省科学研究費補助金突発災害調査研究成果，平成5年北海道南西沖地震・津波とその被害に関する調査研究（No. 05306012），pp.161-170.
- Matsuoka, M. and N. Nojima (2010) : Building Damage Estimation Using Seismic Intensity and Satellite L-band SAR Imagery, Proc. 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering and 5th International Conference on Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, pp.235-242.
- Shuto, N. (2007) : Damage and Reconstruction at Okushiri Town Caused by the 1993 Hokkaido Nansei-oki Earthquake Tsunami, Journal of Disaster Research, Vol. 2, No.1, pp.44-49.