TerraSAR-X強度画像の変化に着目した 津波被災地の建物被害程度の把握

Estimation of Tsunami-induced Building Damage Using TerraSAR-X Intensity Images

堺 友里¹・越村俊一²・松岡昌志³

Yuri SAKAI, Shunichi KOSHIMURA and Masashi MATSUOKA

A rapid damage mapping with remote sensing and geoinformatics is essential for effective disaster response and recovery efforts. Among the remote sensors, Synthetic Aperture Radar (SAR) is remarkable for its capability to observe the Earth's surface regardless of weather conditions. In this paper, in order to acquire the measure of building damage level in the tsunami-affected areas, the authors analyzed a set of pre- and post-event TerraSAR-X intensity images. Focusing on the difference (d) and correlation coefficient (r) between backscattering coefficients of pre- and post-event images yields good estimation of structural damage with a form of discriminant regression function of d and r , with the accuracy of more than 70 %.

1. はじめに

2011年3月11日に三陸沖を震源としたM9.0の東北地方太平洋沖地震が発生し、我が国太平洋岸に甚大な被害をもたらした。震災の教訓の一つとして、発災後の効果的な災害対応や復旧活動には、建物など社会基盤施設の直接被害とその空間分布の早期把握が重要であることが挙げられている(越村ら, 2012)。

広域に発生した被害を把握するためには、人工衛星や航空機によるリモートセンシング技術が有効である。2000年からは、仏国立宇宙センター(CNES)及び欧州宇宙機関(ESA)により、災害発生時に各国の地球観測衛星データなどを無償提供する枠組み(国際災害チャータ)が立ち上がるなど、リモートセンシング技術の災害対応・救援活動への貢献が期待されている。

リモートセンシングで利用されるセンサのうち、合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar: SAR)は近年大きく注目されている。合成開口レーダは昼夜や天候を問わず地表の観測が可能であり、そのため画像アーカイブも充実している。また、SARの観測値は、地表の凹凸や誘電率に強く依存した物理量(後方散乱係数)で、地表変化を絶対的に計測できることから、ある事例に基づき構築された変化抽出手法を、他地域へ適用できる可能性もある。さらに最近では、高解像度・短波長衛星が打ち上げられ、発災直後の状況下における詳細な地表面の状況把握技術の開発およびその実用が期待されている。

SARによる緊急観測結果は、これまでも災害による地表状況の変化や建物などの被災状況の把握に利用され

てきた(越村・松岡, 2010)。特に災害発生前後の地表変化や建物被害域のマクロな検出には多くの実績があるが、建物一棟毎の被害状況を把握することは、使用するレーダー波の分解能や波長の特性を考えると適しているとは言えなかった。近年Xバンドレーダーが人工衛星に搭載されるようになり(TerraSAR-X, COSMO-SkyMed)、短波長・分解能の向上により、詳細な地表面の状況把握が可能になりつつある(たとえばリュウら, 2012)。

本研究では、世界最高分解能のSAR画像(TerraSAR-X画像)を用いて、建物被害程度の把握手法の構築を行う。そのために、津波被災地の被災前後の画像解析を通じて得られた画像特性の変化と建物被害程度の関連性を明らかにする。具体的には、前処理・ラジオメトリック補正およびフィルタによる画像の前処理を行った後に災害前後の2時期画像の変化抽出を行う。特に被災前後の画像特性(後方散乱係数)の変化に着目し、2011年東北地方太平洋沖地震津波の建物被害データを利用して、建物被害程度を判別するための判別関数、被災区分判別指標モデルを構築し、最後にその精度評価を行う。

2. 2時期TerraSAR-X画像の変化抽出法

(1) 使用データ

解析対象領域は、2011年東北地方太平洋沖地震津波により甚大な被害が報告された仙台市宮城野区蒲生である(図-1)。解析に利用したのは、2010年10月20日と2011年3月12日(いずれもUTC)にTerraSAR-X(表-1)の観測によって得られた強度画像(ピクセル値:後方散乱係数(SigmaNought [dB]))を利用した。また、建物被害情報は、国土地理院の航空写真を独自に判読して得た被害情報と、国土交通省都市局による調査結果(家屋一棟毎の被害程度を7区分にしたデータ)を2区分(被災区分1, 2

1 学生会員 東北大学大学院工学研究科
2 正会員 博(工) 東北大学教授 災害科学国際研究所
3 非会員 博(工) 東京工業大学准教授 総合理工学研究科

図-1 仙台市宮城野区蒲生地区のフィルタ処理後TerraSAR-X強度画像 [(a) 2010.10.20 (UTC) 撮影, (b) 2011.3.12 (UTC) 撮影]

表-1 TerraSAR-X衛星諸元

搭載センサー	アクティブフェーズドアレイ
観測周波数	Xバンド (9.95 GHz)
地表分解能 (StripMapモード)	3 - 15m
標準シーンサイズ (StripMapモード)	30 × 50 km
軌道日数	11日
打ち上げ日	2007年6月15日
運用機関	ドイツ航空宇宙センター

表-2 国土交通省による建物被害調査結果の2区分編成結果

被災区分名	定義	使用した建物数
被害程度大	完全流失 壁の大半が流失 構造に損傷	690
被害程度小	壁の損傷が軽微 ～被災なし	1542

と3-7、表-2)に再編したデータを利用した。データの再編を行ったのは、観測対象物の形状に強く反応するというSARの特性を考慮し、物的被害が明瞭な区分を「被害程度大」、それ以外を「被害程度小」とするためである。

(2) TerraSAR-X画像の前処理

SAR画像には、スペckルノイズと呼ばれるコヒーレント系特有のごま塩状のランダムな濃度のゆらぎが含まれる。さらに、TerraSAR-X画像は、短波長帯であるXバンドのマイクロ波によって観測されており、敏感に地表物に反応している可能性が高い。正確な画像解析を行うためには、これらのノイズを適切な処理により除去する必要がある。そこで本研究では、2段階に分けてこれらのノイズを除去した。

a) フィルタ処理

スペckルノイズを低減する方法の一つとして、Enhanced Leeフィルタ処理 (Lopesら, 1990) を適用した。フィルタ処理を施す際のウィンドウサイズについては、詳細な地表情報を保持するために、最も小さい3×3ピクセルウィンドウ幅にした。

b) ピクセルウィンドウの作成

次に、ウィンドウ内における後方散乱係数の平均値を求め、ウィンドウ内中央値にその値を挿入する。これを1ピクセルずつずらしながら画像全体について計算を施し、ピクセルウィンドウを作成する。ウィンドウサイズは5×5, 9×9, 13×13の3つに設定した。

(3) 2時期画像の変化抽出法

a) 後方散乱係数の差分値 d 、相関係数 r の算出

2時期の画像から後方散乱係数の差分値 d [dB] と相関係数 r の2種類の特性値を算出した。差分値 d とは、2画像間の後方散乱係数の変化の大きさを表す指標であり、相関係数 r は、2画像間の相関性の高さを示す統計学的指標ある。差分値 d は、フィルタ処理およびピクセルウィンドウ作成後の画像から求めた。相関係数 r はフィルタ処理後の画像を用い、計算過程においてピクセルウィンドウを作成しながら算出した。本研究ではそれぞれ次式により求めた。

$$d = \bar{I}a_i - \bar{I}b_i \dots\dots\dots (1)$$

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

ここで d は後方散乱係数の差分値[dB]、 r は相関係数、 N は計算ウィンドウ内のピクセル数を表す。 $I a_i$ 、 $I b_i$ は被災後と被災前の画像の i 番目のピクセル値、 $\bar{I} a_i$ 、 $\bar{I} b_i$ は被災後と被災前のそれぞれの画像の i 番目のピクセルの周囲5×5, 9×9, 13×13ピクセルの平均値である。被災後の建物一棟毎に対応した d と r は、上式から求めた各特性値から建物輪郭データ内ピクセル値の平均値を計算し、各建物の代表値とした。

b) 判別関数 Z の導出

被害程度大からはすべての建物情報を用い、被害程度小からは被害程度大と同じサンプル数になるよう690棟をランダムに選定し、トレーニングサンプルを作成した。

図-2 異なるピクセルウィンドウサイズ (5×5, 9×9, 13×13) により再構築したTerraSAR-X画像 (2011年3月12日, UTC) と被災区分別の後方散乱係数の差分値 d と相関係数 r の散布図 (仙台市宮城野区)

図-2に、フィルタ処理後の画像から3つのウィンドウサイズで求められた図の一部と、横軸に差分値 d 、縦軸に相関係数 r をとった各ピクセルウィンドウサイズにおける散布図を示す。これらの図を用い、そのサイズの妥当性を比較検討した。5×5, 9×9の画像は、ノイズが十分に除去されていないと見られ、全体的にばらつきが大きく、また各被災区分の分布特性の違いも不明瞭であった。そこで本研究では、3つのウィンドウサイズのうちノイズの影響が軽減され、最も各被害程度の分布特性が明確であった、13×13のウィンドウを用いて解析を進めた。被害の大小に関連して d と r の分布傾向は異なることが分かったため、その境界を明らかにすることで、被害程度の判別指標構築を試みる。境界線の構築には、群判別のための一手法である判別分析 (奥野ら, 1981) を適用し、2区分された被災区分に対する2時期SAR強度画像情報 (d, r) の判別関数を算出した。得られた判別関数 Z は次式の通りである。

$$Z = 0.024d + 0.935r \dots\dots\dots (3)$$

3. 仙台市宮城野区蒲生における変化抽出の検証

以下では、仙台市宮城野区蒲生地区 (図-1) における適用結果について述べる。具体的には、後方散乱係数の差分値および相関係数と、現地調査による建物被害状況

表-3 算出した Z の平均値および標準偏差

被災区分	Z の平均値	Z の標準偏差
被害程度大	0.428	0.231
被害程度小	0.665	0.192

との関連性を考える。図-3から、被害程度が大きい地域ではばらつきが大きい、被害程度が小さくなるに従い差分値は0に収束し、相関係数は高い値を示す傾向があることがわかった。

(1) 差分値 d

全体として差分値は正となる傾向が見られる (図-3)。差分値が正となるのは、被災後の後方散乱係数が高い、すなわち被災前後で「平坦な地表から凹凸のある地表への変化」と「誘電率が高くなる状況への変化」が考えられる。また、水分含有量の高い土壌は、後方散乱係数が高いという性質がある (大内, 2004)。本研究対象領域が津波被災地であること、また使用画像が津波来襲2日後に観測されたことを考えると、差分値が正の傾向にあるのは、土地全体が浸水したことによる可能性が高く、津波被災地のSAR画像の特徴的な性質を示している。また、差分値が負となるのは、「凹凸のある地表から平坦な地表への変化」場合であり、流失などの被害程度が大きかった領域の抽出に有用である事がわかった (図-3 (e))。

図-3 (a) 被災区分別の後方散乱係数の差分値 d と相関係数 r の散布図および判別関数 $Z=0.55$ の境界線, (b) 被災区分別各建物での d と r の平均値および標準偏差, (c) 被災区分「被害程度大」の建物での d と r の散布図および平均値, (d) 被災区分「被害程度小」建物の d と r の散布図および平均値, (e) 差分値 d の頻度分布, (f) 相関係数 r の頻度分布

(2) 相関係数 r

相関係数は、1に近いほど2画像間の物理的特徴の相関性が高いことを意味している。被害程度が小さい建物は、0.8～1と高い相関係数値になっているものが多く、被害調査結果によく対応していた結果が得られた（図-3(f)）。ただし、高い相関係数の建物の中には、被災建物もあった。航空写真を用い判読したところ、これらの家屋は周囲の構造物に比べ高さ・幅とも小さく、家屋形状把握が困難な状況にあった。そのため、算出結果に反映されなかったことが要因であると考えられた。

(3) 判別関数 Z と実被害との関連性

前節において、TerraSAR-X画像の差分値・相関係数の関連で判別関数 Z を求めた結果（式（3））、 Z が小さくなるほど被害程度大の区分になる傾向があることが分かった（図-4）。

(4) 精度評価と課題

前節の判別関数 Z の特徴を踏まえ、解析対象領域内の家屋被害の分類に適用する。ただし、判別関数 Z の導出時点では、境界線となる直線の傾きしか決まっておらず、被災区分の判別境界線を構築するには切片の情報が必要である。ここでは、最も検出精度が高かった $Z=0.55$ と決定し（図-3(a)）、各建物を2被災区分にした。その建物分布結果を図-5に、精度評価の結果を表-4に示す。導出

図-4 算出された判別関数 $Z = 0.024d + 0.935r$ の被災区分別頻度分布図

した Z （式（3））は、式からわかるように差分値より相関係数に大きく起因することがわかる。実際、検出結果と実被害データを比較すると、被害程度が小さい領域における対応関係が良好であった（図-5）。また、検出結果について精度評価を行ったところ、「被害程度大」区分、「被害程度小」区分的中率は76.5%、72.5%、網羅率はそれぞれ70.3%、78.4%であり、総合精度では74.3%という結果が得られ、すべてにおいて70%以上の精度で被災区分の大小を検出できたことがわかった。一方、本指標が他の津波被災地で適用できる普遍的なものであるか

図-5 (a) 国土交通省の被害調査結果に基づいて作成した建物被害分布図, (b) 判別関数Zにより作成した $Z = 0.55$ のときの建物被害分布図

表-4 建物被害調査結果 (国土交通省都市局) による精度評価結果

Z=0.55		建物被害調査結果 (棟)			的中率
		被害程度大	被害程度小	合計	
本研究 (棟)の 検出	被害程度大	485	149	634	76.5%
	被害程度小	205	541	746	72.5%
	合計	690	690	1380	
	網羅率	70.3%	78.4%		74.3%

どうかを見極めるには、さらなる検討が必要である。

4. まとめ

東北地方太平洋沖地震津波の被災地を捉えた2時期のTerraSAR-X画像を用いて、後方散乱係数の差分と相関係数に着目した変化抽出から建物被害程度を把握する手法を開発し、仙台市での検証を行った。

後方散乱係数の差分値および相関係数と、現地調査による建物被害状況との関連性を考察した結果、差分値は被害程度が大きい地域、相関係数は被害程度が小さい地域の抽出に有用であることを確認した。また、TerraSAR-X画像の差分値・相関係数の関連で建物被害程度の区分別判別を行うための判別関数 $Z = 0.024d + 0.935r$ を求め、仙台市宮城野区における建物被害状況の把握を行った。判別関数Zによる被害程度の把握結果は実被害状況とよく対応しており、Zが低くなるほど重大な被害となることが分かり、その結果は74.3%の総合精度で検出することができた。

以上より、津波発災前後2時期のTerraSAR-X画像変化抽出により、建物被害程度に対応した地表状況の把握が可能であることが実証された。被災直後の緊急衛星観測

が実現すれば、建物被害の面的な把握が可能であることが示された。

謝辞：建物被害情報は、国土交通省都市局から津波被災現況調査データ（第二次報告時点）を提供頂いた。TerraSAR-X画像は株式会社パスコとの共同研究の一環として提供を受けた。本研究は、科学研究費補助金（課題番号：25242035, 24241059, 25282117）、および東北大学災害科学国際研究所特定プロジェクト研究の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 大内和夫 (2004)：リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎，東京電機大学出版局，pp.41-114
- 奥野忠一・久米 均・芳賀敏郎・吉澤 正 (1981)：[改訂版] 多変量解析法，日科技連，pp.259-321.
- 国際災害チャータ (2013)：Disaster Charter - Homepage, International Charter 'Space and Major Disaster', <http://www.disasterscharter.org/>, 2013年7月1日
- 越村俊一・郷右近英臣・福岡巧巳・林 里美 (2012)：リモートセンシングによる2011年東北地方太平洋沖地震津波の広域被害把握，日本地震工学会論文集，第12巻，第6号 (特集号)，pp.50-62.
- 越村俊一・松岡昌志 (2010)：合成開口レーダーを利用した津波被害の面的把握，土木学会論文集B2，Vol.66，No.1，pp.1426-1430.
- リュウ ウェン・山崎文雄・郷右近英臣・越村俊一 (2012)：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浸水域と建物被害の抽出，日本地震工学会論文集，第12巻，第6号，pp.73-85.
- Lopes, A., R.Touzi, and E.Nezry (1990)：Adaptive speckle filters and scene heterogeneity, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 28(6), pp.992-1000.
- Matsuoka, M. and N. Nojima (2010)：Building Damage Estimation by Integration of Seismic Intensity Information and Satellite L-band SAR Imagery, Remote Sensing 2 (9), pp.2111-2126.