

高解像度衛星SAR画像を用いた福島第一原発建屋の被害把握 Detection of damage to reactor buildings in Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant using high-resolution satellite SAR images

○山崎文雄¹, 岩崎洋志², リュウ・ウェン³
Fumio YAMAZAKI¹, Yoji IWASAKI² and Wen LIU³

¹千葉大学 大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Chiba University

²千葉県庁

Chiba Prefectural Government

³東京工業大学 大学院総合理工学研究科

Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

Building damage such as to side-walls or mid-story collapse is often overlooked by optical satellites 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. Two-temporal TerraSAR-X images covering Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant were employed to detect building damage due to hydrogen explosions after the 2011 Tohoku, Japan earthquake. The difference in backscattering coefficients before and after the event in layover and radar-shadow areas showed the damage to the reactor buildings.

Keywords : TerraSAR-X, layover, radar shadow, 2011Tohoku earthquake, building damage, tsunami, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant

1. 研究目的

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。とくに東日本大震災の場合は、福島第一原子力発電所の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^{1),2)}。

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、合成開口レーダー(SAR)に大別される。光学センサや熱赤外センサに比べると、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、松岡らによる一連の研究^{3,4)}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^{5),6)}。

SARセンサに関しても、最近では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衛星が運用されている。これらから得られた強度画像を用いて、地殻変動の抽出⁷⁾、津波湛水域の抽出⁸⁾、建物被害把握⁹⁾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特性を利用して、それらの領域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. 建物被害の有無によるSAR画像上の変化

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1に示すように、地上に立つ建物はグラウンドレンジ上で倒れ込みを起こし、また建物の背面でマイクロ波が届かないところはレーダー影となる。

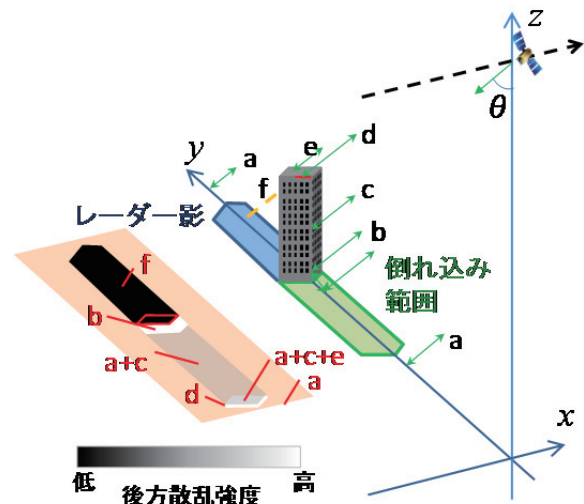


図1 SAR画像上の建物の倒れ込みとレーダー影

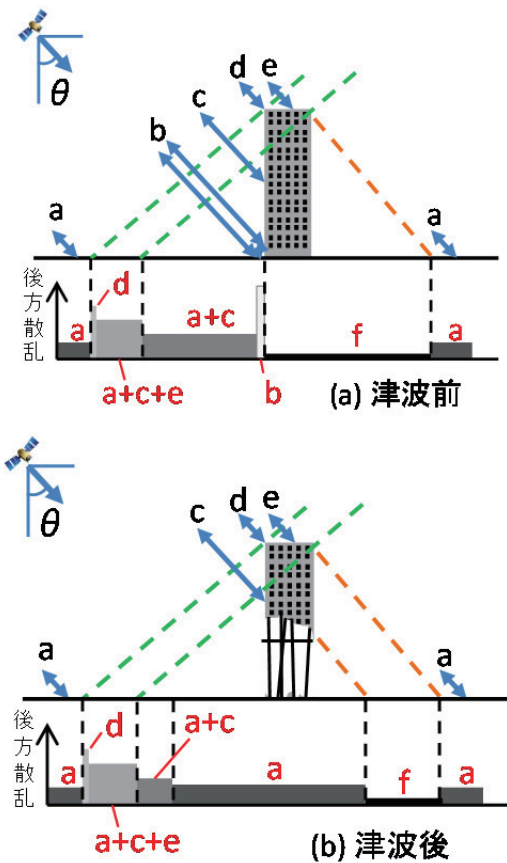


図2 SAR画像上の建物の倒れ込みとレーダー影

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¹⁰⁾。このことから、津波によって側面に被害を受けた建物では、図2に示すように、倒れ込み範囲の後方散乱に変化が表れると考えた。このような特徴は津波による建物被害の把握に使えるはずである。

本研究では、福島第一原子力発電所を対象に、倒れ込み範囲とレーダー影の爆発前後の後方散乱係数値の変化から、原子炉建屋の被害把握を試みる。

3. 福島原発事故のSAR画像を用いた被害把握

本研究の検討には、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画像を用いる。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3)。各画像を後方散乱係数 σ^0 へと変換した後¹¹⁾、Leeフィルタ¹²⁾を3×3のウィンドウで適用しスペクトルノイズを低減した。ここで用いた画像は、ともに地震後のものであるため、地殻変動を打ち消すための位置補正⁸⁾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による画像をSAR画像との比較に用いた。

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

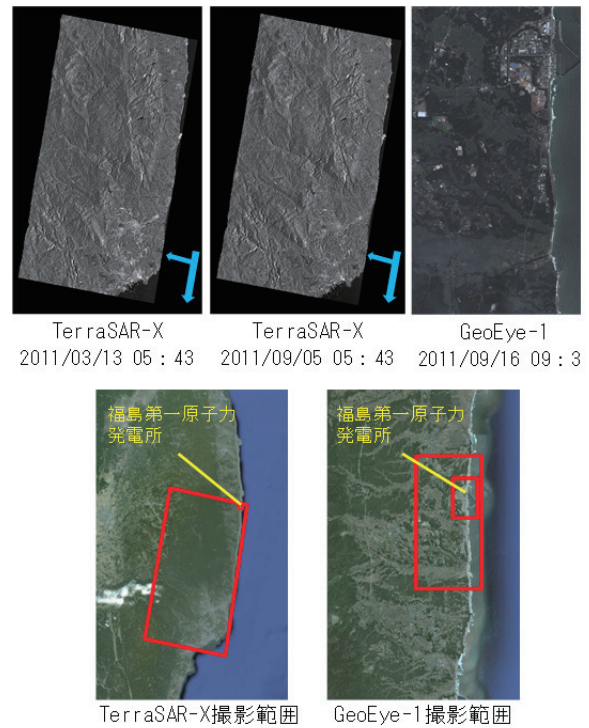


図3 使用するTerraSAR-XとGeoEye-1画像の範囲

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¹³⁾と比較しながら、SAR画像上の変化を考察する。

4. 倒れ込み範囲とレーダー影の強度値の変化

水素爆発による建屋被害の把握では、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は、図4に示すように画像上に現れる。これらを利用して、経済産業省Webページ¹⁴⁾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5にそれらを示す。

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

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

ここで、 θ はマイクロ波の観測(入射)角、 H は建屋高さ、 L は倒れ込み長、 L' はレーダー影長である。

以上の方法によって求めた倒れ込み範囲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1に示す。この範囲における後方散乱係数は、4号機建屋で平均値の減

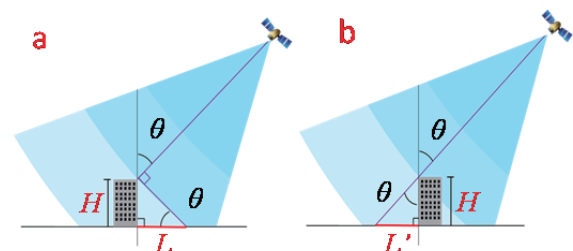


図4 マイクロ波とグランドレンジ画像上に投影される建物の倒れ込み範囲Lとレーダー影L'

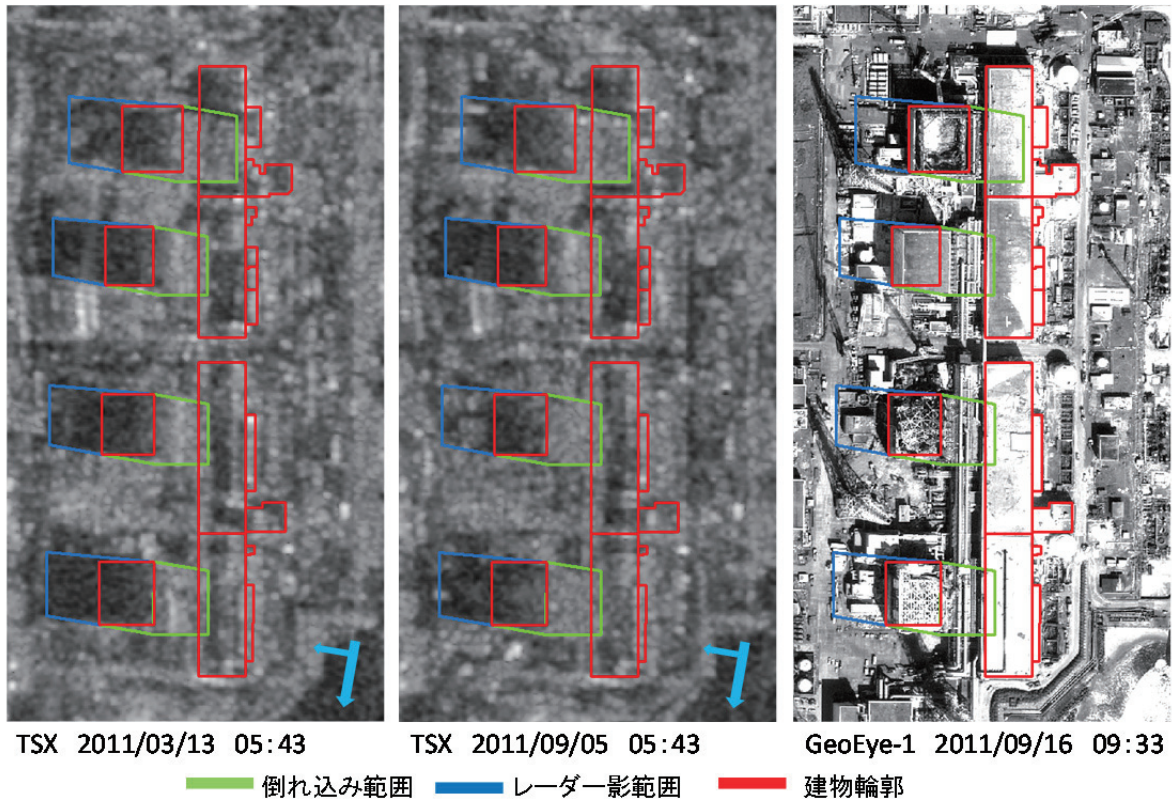


図5 各原発建屋についての倒れ込み範囲，レーダー影範囲，建物輪郭（北から1，2，3，4号機の順）

表1 原発建屋の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)
1号機	2011/3/13	-2.56	
	2011/9/5	1.33	3.88
2号機	2011/3/13	-0.20	
	2011/9/5	0.99	1.19
3号機	2011/3/13	-0.58	
	2011/9/5	-0.34	0.24
4号機	2011/3/13	-0.12	
	2011/9/5	-1.06	-0.94

表2 原発建屋のレーダー影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)
1号機	2011/3/13	-10.97	
	2011/9/5	-8.52	2.44
2号機	2011/3/13	-15.58	
	2011/9/5	-14.55	1.04
3号機	2011/3/13	-16.35	
	2011/9/5	-12.98	3.37
4号機	2011/3/13	-16.35	
	2011/9/5	-13.10	3.25

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6）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一つとして考えられる。

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¹³⁾（図6）。

一方、表2に示すレーダー影の範囲の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



図6 2011年9月15日の各原子炉建屋の状況（東京電力資料¹³⁾）

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せたと考える。

5. まとめ

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。2011年東北地方太平洋沖地震により、建屋の爆発事故のあった福島第一原子力発電所に対し、前後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。

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と考えている。

参考文献

- 1) 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, 344-367, 2011.
- 2) 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, 198-205, 2011.
- 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) 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, pp.73-86, 2010.

- 5) 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, 193-200, 2007.
- 6) 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, 1-11, 2010.
- 7) 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)，3-13, 2012.
- 8) 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)，73-85, 2012.
- 9) 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.
- 10) 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, 2403-2420, 2010.
- 11) Infoterra: Radiometric Calibration of TerraSAR-X Data: http://infoterra.de/fileadmin/Verzeichnisdorder/Dokument/e/2_AboutUs/0207_FormalDocs/TSXX-ITD-TN-0049-radiometric_calculations_11.00.pdf
- 12) Lee, J. S, Jurkevich, L., Dewaele, P, Wambacq P., and Oosterlinck, A.: Speckle filtering of synthetic aperture radar images, A review, Remote Sensing Reviews, 8(4), 313-340, 1994.
- 13) 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>
- 14) 経済産業省：<http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/backdrop/pdf/pp-chap04-3.pdf>