

高分解能衛星 SAR 画像を用いた建造物の形状と被害の把握

Detection of Building Shape and Damage Using High-resolution Satellite SAR Images

11TM0305 岩崎 洋志
Yoji Iwasaki

指導教員 山崎 文雄

SYNOPSIS

This paper proposes the method to detect building damages difficult to observe from vertical imagery from the change in layover effects and radar shadow in SAR intensity images. Multi-temporal TerraSAR-X images of central Tokyo, Sendai-Shiogama Port, and Fukushima No. 1 Nuclear Power Plant were selected as examples. The measurement of building heights was carried out using layover effects in SAR intensity images. The tests for TerraSAR-X images in Tokyo Metropolitan area showed good level of accuracy in building height estimation. The calculation of difference value was carried out using layover effects and radar shadow for Sendai-Shiogama Port and Fukushima No. 1 Nuclear Power Plant. Based on the calculation of difference value, wall damage and nuclear reactor building damages were successfully detected.

1. はじめに

地震や風水害などの災害時には、早急で正確な被災状況把握が必要である。しかし、災害発生時は交通ネットワークが麻痺し、早期に現地へ立ち入ることが困難となることが多い。また、東日本大震災における原発事故のように放射能汚染などによって対象区域内の立ち入り・飛行が不可能な場合もある。このような課題の解決策として、人工衛星からのリモートセンシング技術の活用が考えられる。

光学センサ画像を用いた建物被害把握は、これまでに数多く行われ、2010年ハイチ地震では、災害後のGeoEye-1やWorldView-2といった高解像度衛星による画像を用いて、国連機関のUNOSATなどによる被災地図の緊急作成が行われている¹⁾。しかし、光学センサ画像の目視判読では、結果に個人差があり、その精度が高いとは言い難い。また、光学センサは夜間や曇天時の撮影が不可能であることや、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枚の航空写真²⁾や光学衛星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。

そのような問題点を解決するため、本研究ではマイクロ波を利用して地表の情報を得る合成開口レーダ(SAR)衛星で得られた強度画像を用い、建物高さや側面被害を把握することを試みる。本研究では、画像上の建物の倒れ込み領域とレーダーシャドウにおける値の変化や長さから、建造物の形状や高さを把握し被害を判別する手法を提案する。今回は、東京スカイツリー、首都圏の高層建築物、仙台塩釜港、福島第一原子力発電所に対し本手法を用い有用性の検討を行った。

2. SAR 画像の倒れ込み長さによる建物高さの把握

2.1 使用データと対象地域

本研究のSAR画像を用いた建物高さの把握では、SAR衛星TerraSAR-X(TSX)のStripMapモードによって撮影された7時期の強度画像を用いた。各画像の撮影日は、2008年5月23日、2008年10月13日、2009年11月2日、2009年11月24日、2010年6月21日、2010年9月6日、2010年11月22日である。解像度がアジマス方向に約3.5m、レンジ方向に約3.3mの画像を幾何補正(EEC)後に1.25m/pixelの解像度にリサンプリングしたものをを用いた。これらの画像を用い、東京スカイツリー建設過程における高さ変化の把握、首都圏の高層建物の高さ把握、さらに東日本大震災で被災した建築物を対象とした被害検出を行った。

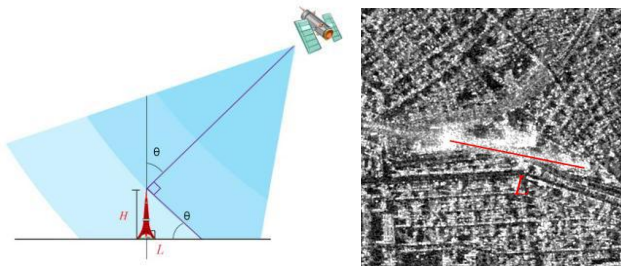
2.2 倒れ込み長さの計測による建物高さの算出

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を観測することによって建造物等を認識する。そのため、地表上に標高差がある場合、標高の高い場所が衛星に近い位置と誤って判断されるForeshortening現象が起こり、高い建物などでは倒れ込みが起こる(図1a,b)。この現象を利用して、SAR強度画像上における建物の倒れ込みの長さとして照射したマイクロ波の入射角を用いて建物高さを求める。

本研究ではまず前処理としてSAR強度画像(DN値)を後方散乱係数 σ^0 へと変換した³⁾。次にLeeフィルタ⁴⁾を適用しスペックルノイズを低減させた。フィルタの大きさは、平滑化で建物の輪郭がぼやけるのを防ぐために、最低限の3×3を用いた。

建物高さを算出する方法としては、衛星が照射するマイクロ波が同心円状に広がり、その円が対象物に比べて十分に大きく接線が直線として近似できるという特性(図1a)を利用し、画像上に倒れ込むように投影される建物の基部からその頂点までの長さ L を計測した。各3回ずつ計測を行い、それらの平均値を用いて、(1)式より高さ H を算出する。

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



(a) SAR衛星観測の模式図 (b) 東京スカイツリー (TSX) 図1 マイクロ波とグラウンドレンジ画像上に投影される構造物位置の関係

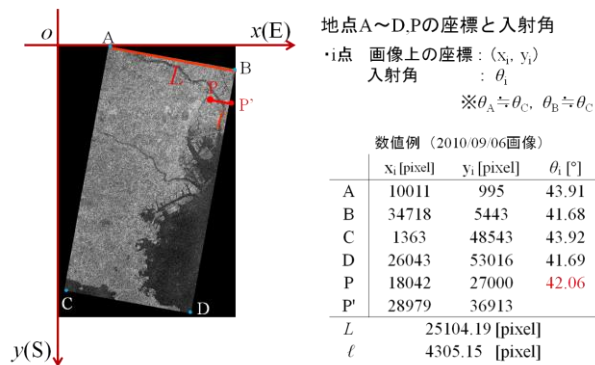


図2 計測対象物への入射角の計算例(東京スカイツリー)

ここで、計測対象へのマイクロ波入射角 θ を求めるため、図2に示すように画像が長方形であり、 θ_A と θ_C 、 θ_B と θ_D がそれぞれほぼ等しい値であるという特徴を用いて、直線ABの一次関数から直線 l の一次関数を求め、点BD間の一次関数から点P'の座標を求める。点P、点P'の座標より、直線PP'の長さを求め、直線ABと直線PP'の長さとの比から対象物への入射角 θ を求めた。

2.3 各対象物の倒れ込み長さの計測結果

東京スカイツリーの倒れ込み長さの計測結果と、建設過程における公表された高さを図3に示す。SAR画像の計測結果は、2009年11月24日、2010年6月21日、2010年9月6日の画像では、3m以上の誤差が出ている。2009年11月24日、2010年6月21日の画像は、タワー脚部の見誤りによる誤計測や、衛星画像撮影日のタワー高さを直線補間によって推定したことによる実際の高さとの違いによると考えられる。2010年9月6日の画像に関しては、大林組サイトよりの建設工程を確認してみたところ⁵⁾、タワーの中央にシャフトと呼ばれるエレベーターや設備配線・配管などが入る躯体を組み立てる工程であったことから、急激に高さが伸びたことが予想され、これが原因による誤差であると考えられる。

また、横浜ランドマークタワー、幕張アパホテル東京ベイの計測結果をそれぞれ図4、図5に示す。

横浜ランドマークタワー、幕張アパホテル東京ベイの計測結果は誤差が出たものの、すべての計測結果は3m以内であり、画像解像度が3mであるTSX画像(StripMapモード)では3m以下の高さを求めることは困難であることから、この結果は許容範囲内であり妥当といえる。以上の検討より、SAR画像上の構造物の倒れ込みの長さマイクロ

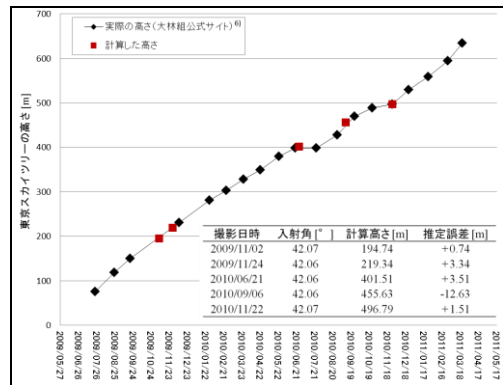
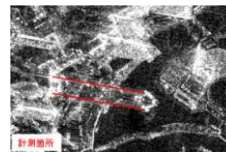
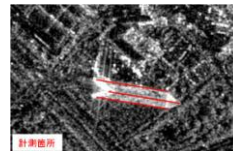


図3 東京スカイツリーのSAR画像上の計測結果と公表された実際の高さの比較



撮影日時	入射角[°]	計算高さ[m]	誤差[m]
2008/05/23	42.87	297.1	-0.77
2009/11/24	42.87	298.76	-2.43
2010/06/21	42.87	297.21	-0.88
2010/09/06	42.88	297.72	-1.39
2010/11/22	42.87	295.7	0.63

図4 横浜ランドマークタワー(296.3m)のSAR画像計測結果と実際の高さの比較



撮影日時	入射角[°]	計算高さ[m]	誤差[m]
2008/10/13	40.48	171.75	2.85
2009/11/02	40.47	172.13	0.47

図5 幕張アパホテル東京ベイ(174.6m)のSAR画像計測結果と実際の高さの比較

波の入射角から構造物高さを算出する方法の有効性を示すことができた。

3. SAR画像を用いた津波被害把握

3.1 使用データと対象地域

2章と同様の処理レベルのTSX画像を用いて検討を行った。使用画像は、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時期の画像を用いる。各画像は後方散乱係数 σ^0 へと変換し³⁾、Leeフィルタ⁴⁾を 3×3 で適用した。対象地域は津波被害を受けた仙台塩釜港とした。初めにGoogleEarthストリートビュー上で確認した津波被害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棟をそれぞれ比較し、被害の有無による違いを検証した。次に塩釜港の建物、計101棟を対象に精度評価を行った。

3.2 倒れ込み範囲の津波前後における値の変化

2.2節でも述べたように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を観測することによって構造物等を認識する。そのため倒れ込み範囲の値は図6に示すように側面の散乱強度を含んだ値となっている。このことに着目し、この倒れ込み範囲の散乱係数の平均値の変化から建物側面の被害を把握することを試みた。

今回はまずGoogleEathの光学画像から建物輪郭を作成し、この建物輪郭を津波前のSAR画像に重ね目視で比較しながら照射方向に移動させ、倒れ込み輪郭を作成した。この輪郭内の値を散乱係数平均値とし津波前後での変化を検討した。図7に2時期の事後画像(2011/3/13, 2011/4/4)の値から事前画像(2010/10/21)の値を引いた値を示したグラフを示す。このグラフからわかるように被害を受けた建

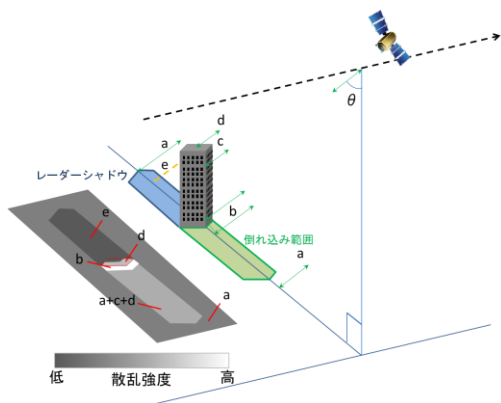


図6 観測点と散乱強度の関係

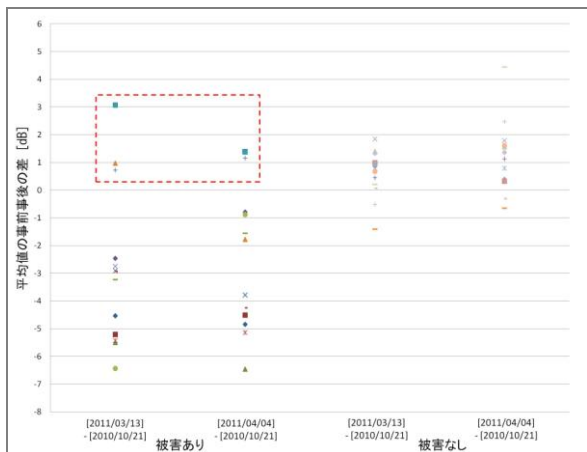


図7 被害の有無による散乱係数の事前事後差の比較

建物では散乱係数平均値が減少する傾向が見られ、無被害の建物では、ほぼ一定の値を示していることがわかる。また、図6に示すように倒れ込み範囲の値は地表面の形状の値も含まれる。このことから図7の破線で囲った範囲の建物のように津波によって押し流された強い散乱強度を示す自動車や瓦礫の影響によって事前画像の値よりも高い値を示す場合があることもわかった。

3.3 精度評価

3.2節の結果から被害の有無の閾値を0と仮定し、本手法の精度評価を行った。使用データは2010年10月21日、2011年3月13日の画像を用いた。対象地は同じく仙台塩釜港を対象とし計101棟の建物に対し検討を行った。今回は復興支援調査アーカイブにおける現地調査結果⁷⁾と本手法の判定結果を比較した。この現地調査では、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ランクに分けられ、全壊(流出)判定以外の建物を対象として選んだ。図8に現地調査における被害程度の判定例を示す。本研究では、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て精度評価を行う。

以上の方法によって求めたエラーマトリックスを表1に示す。全壊判定を受けた建物では Producer's Accuracy, User's Accuracyともに80%以上の高い精度を示しているが、全壊(一階天井以上浸水)の判定を受けた建物の Producer's Accuracyが50%という結果となった。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



図8 現地調査における被害判定

表1 エラーマトリックス

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(%)
SAR								
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

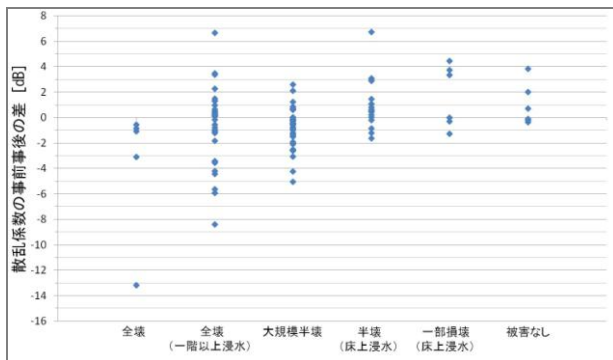


図9 各被害程度の散乱係数差の分布

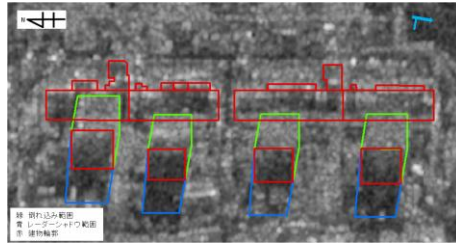
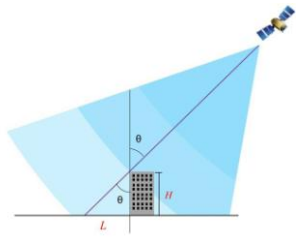
についてもこの被害判定を受けている可能性があるためであると考えられる。このことは図9の各被害程度の散乱係数の事前事後差の分布を表したグラフで大きなばらつきが出ていることから同様のことがいえる。また、半壊以下の被害判定の精度についてはサンプル数が少ないため一概には言えないが、図6で示したように倒れ込み範囲内の値が側面のみではなく地表面の形状の値も含んでいるため、自動車など散乱強度の強い障害物の有無によって誤判定が起きてしまった可能性が考えられる。

以上の結果から本手法による被害判定は精度面でやや過大が残るものの、光学画像で確認することができない側面部の被害推定が可能であることを示すことができた。

4. 福島原発事故における SAR 画像を用いた被害把握

4.1 使用データ

福島第一原子力発電所では、地震と津波によって燃料冷却に必要な交換電源が失われ炉心が融解し、1,3,4号機の建屋で水素爆発が発生した。本章では、この水素爆発による建屋損傷をこれまでの研究手法を用いて把握することを試みる。使用データは2011年3月13日、2011年9月5日の2時期の画像を用いた。両画像とも画像処理レベルはこれまでと同様で後方散乱係数 σ^0 へと変換し⁵⁾、Leeフィルタ⁶⁾を3x3で適用した。今回は1~4号機について検討を行い、両画像の撮影時差内に被害のあった3,4号機建屋と建屋被害のない2号機建屋を比較しその違いを考察する。1号機ではすでに爆発事故が発生した後のため事後対応を記した東電資料⁹⁾と比較しながら、SAR画像上の変化を考察した。



(a) レーダーシャドウの模式図

(b) 原発建屋と倒れ込み・レーダーシャドウ輪郭(TSX・GeoEye)

図 10 マイクロ波とグランドレンジ画像上に投影されるレーダーシャドウの関係

表 2 各原発建屋における倒れ込み範囲の散乱係数の変化

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

表 3 各原発建屋におけるレーダーシャドウ範囲の散乱係数の変化

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

4.2 倒れ込み範囲とレーダーシャドウの値の変化

原発の被害把握では、原発の複雑な構造上、倒れ込み範囲に強い散乱強度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シャドウを用いた変化と併せて被害を検証した。また今回は建屋の断面図が経産省 HP⁸⁾で公開されているため、この断面図の建屋高さを基に(1)式から倒れ込み輪郭を作成した。レーダーシャドウでは、図 10(a)の模式図に示すようにレーダーシャドウが画像上に現れるため、(2)式からレーダーシャドウ範囲を計算し輪郭を作成した。図 10(b)に原発建屋についての倒れ込み輪郭とレーダーシャドウの輪郭を示す。

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

以上の方法によって求めた結果とその事前事後差を表 2.3 に示す。倒れ込み範囲における散乱係数の変化は 4 号機建屋で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、東電の資料を確認すると 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⁸⁾倒れ込み範囲内の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同様のことが言える。東電の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⁸⁾。

レーダーシャドウを用いた散乱係数の変化では、3,4 号機ともに値の上昇を捉えることができた。(レーダーシャドウ範囲内では、散乱係数が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シャドウの範囲が短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値の上昇がみられる。これは事前画像撮影時のレーダーシャドウの長さが断面図から作成した輪郭よりも短いこと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値が上昇したと考えられる。以上よりレーダーシャドウ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した。

5. まとめ

本研究では、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シャドウから建造物の形状や高さを把握し被害を判別する手法を提案した。本手法を検証するため東京スカイツリー、首都圏高層建築物、仙台塩釜港、福島第一原子力発電所に対し本手法を用い有用性の検討を行った。東京スカイツリー、高層建築物では、倒れ込み長さより建造物の高さを求める検討を行い、高い精度で高さを求めることが可能であることを示した。仙台塩釜港、福島第一原子力発電所では災害前後の倒れ込み領域、レーダーシャドウの値の変化を利用することで津波によって側面に被害を受けた建物や爆発事故によって上部を損傷した原子炉建屋の被害を捉えることができた。

今後は倒れ込み範囲内の瓦礫などの影響を軽減しより精度を高めていきたい。また、画像解析で求めることにより時間を短縮し、有用性のある被害把握手法として発展させたいと考えている。

参考文献

- 1) UNOSAT: <http://unosat.web.cern.ch/unosat/asp/UNOSAT-EQ-201001-HTI.asp>
- 2) 田代啓, 丸山喜久, 山崎文雄: デジタル空中写真測量に基づく新潟県中越沖地震における建物倒壊の把握, 地域安全学会論文集, No. 13, 2010, pp.379-386.
- 3) Infoterra: Radiometric Calibration of TerraSAR-X Data: http://infoterra.de/fileadmin/Verzeichnisdokumente/2_AboutUs/0207_FormalDocs/TSXX-ITD-TN-0049-radiometric_calculations_I1.00.pdf
- 4) Lee, J. S., Jurkevich, L., Dewaele, P., Wambacq P., and Oosterlinck, A.: Speckle filtering of synthetic aperture radar images, A review, Remote Sensing Reviews, 1994, 8: 4, pp.313-340.
- 5) 大林組東京スカイツリーチャンネル: <http://blog.skytree-obayashi.com/?month=201012>
- 6) 大林組東京スカイツリー建設プロジェクト-GO!GO! TOKYO SKY: <http://www.skytree-obayashi.com/pointview/>
- 7) 復興支援調査アーカイブ: <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>
- 8) 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>
- 9) 経済産業省: <http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/backdrop/pdf/app-chap04-3.pdf>