

TerraSAR-X 強度画像を用いた東北地方太平洋沖地震における地殻変動の検出

Estimation of crustal movement due to the 2011 Tohoku, Japan Earthquake from TerraSAR-X intensity images

○リュウ・ウェン¹・山崎 文雄²

Wen Liu and Fumio Yamazaki

Abstract : A method to grasp the surface movement from pre- and post-event TerraSAR-X intensity images is proposed. Since the shifts of non-changed buildings between the two SAR images can be seen as the crustal movements, firstly the buildings in the pre- and post-event images were extracted by a segmentation approach. Then non-changed buildings were detected by matching the buildings in the pre- and post-event images at similar locations. Finally, the shifts were calculated by area-based matching. The method was tested on the TerraSAR-X images for Sendai area and central Tokyo.

Keywords : SAR intensity image, the 2011 Tohoku earthquake, crustal movement, area-based matching.

1. はじめ

2011年3月11日に三陸沖を震源とした M_w 9.0 の東北地方太平洋沖地震が発生した。震源の位置は北緯 38.322°, 東経 142.369°, 深さ約 32 km であった。この地震によって巨大津波が発生し、海岸線から最大約 6km の内陸まで遡上した。地震と津波が原因となった建物損壊、火災、液状化、原子力発電所事故などにより、東日本全域が大きな影響を受けた。

本震及びその後続く余震により、東北地方を中心に広域で大きな地殻変動が発生した。国土地理院が全国に設置した GPS 電子基準点の記録によると、本震直後に宮城県石巻市で東南東方向に 5.3m の水平変位と 1.2m の沈下が観測された。このような広範囲の地殻変動を把握するには、GPS による計測が有効である。しかし、国土地理院が全国に設置した 1,200 箇所の GPS 基準点における平均間隔は約 20km であり、基準点間での地殻変動は計測できない。また、電子基準点が設置されていない発展途上国が多く存在する。一方、面的に地殻変動を把握するに有効な手法として、リモートセンシング画像がよく使用される。合成開口レーダ(SAR)画像の差分干渉処理を用いた地殻変動の検出する研究が多く見られる(Massonnet et. al¹⁾, Stramondo et. al²⁾)。しかしこの方法では、植生被覆の変化による 2 時期 SAR 画像の不干涉や画像の軌道制限などの問題点がある。一方、飛田ら³⁾は Cross-correlation による 2 時期画像の微小ズレを検出する手法(pixel-offset 法)を提案し、幾つかの地震における地殻変動の検出を行った。Pixel-offset 法は SAR 画像だけではなく、光学画像から地殻変動を検出することができる⁴⁾。この手法は、まず 2 枚の画像における位置合わせを行い、その後画像に残る局所の歪みを地殻変動として検

出する。しかし、本地震においては地殻変動範囲が広域に渡り、1 枚の高解像度衛星画像の範囲を超えている。そのため位置合わせをすることができず、地殻変動を正確に検出できない。

本研究では、東北地方太平洋沖地震前後に得られた TerraSAR-X (TSX)強度画像を用いて、無被害建物に注目し、その位置の移動量から地殻変動を抽出する手法を提案する。宮城県沿岸部を撮影した画像に適用し、その結果を GPS 基準点の観測結果と比較することで検証した。

2. 画像データと前処理

本研究では、仙台市を含む沿岸部を撮影した地震前後の TSX 画像を用いた。地震前の画像は 2008 年 10 月 21 日に、地震後は 2010 年 3 月 13 日(地震後 2 日目)に撮影されたものである(Fig.1(a-b))。2 枚の画像ともに下降軌道から HH 偏波で観測された。観測角度は 37.3 度であり、StripMap モードで撮影された。画像は幾何補正(EEC)後に、1.25m/pixel の解像度にリサンプリングされたものを使用した。

地殻変動を検出前に、放射輝度補正とノイズの除法を行う必要がある。放射輝度補正は、オリジナル画像のデジタルナンバー (DN) から、単位面積における放射輝度を表す係数(σ^0)に変換する処理である。また、SAR 画像には多くのスペックルノイズが含まれており、これを除去するために、3×3 ピクセルの Lee フィルタを用いた。地殻変動量を正確に検出するために、2 画像間の位置合わせを行わず、軌道情報のみで補正された位置情報を用いた。

前処理後の 2 時期の画像をそれぞれ R, G, B バンドに入れて、作成されたカラー合成画像を Fig.1 (d) に示す。画像撮影範囲内には「矢本」と「名取」の 2 つの GPS 電子基準点がある。「仙台」基準点は仙台市郊外にあるため、画像の範囲外である。

¹学生会員 千葉大学; 日本学術振興会特別研究員 D2

²正会員 千葉大学 所在地 〒263-852 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33) 連絡先 (Tel; 043-290-3528, E-mail; wen_liu@graduate.chiba-u.jp)

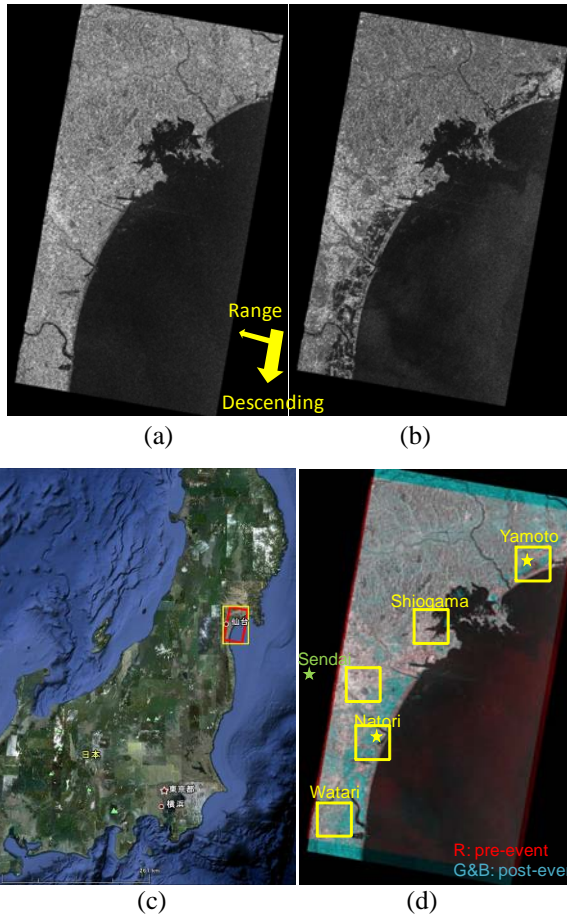


Fig. 1. The pre-event TSX image taken on Oct. 21, 2010 (a) and the post-event one taken on March 13, 2011 (b); the study area along the Pacific coast of Tohoku, Japan (c); the color composite of the processed SAR intensity images (d), in which yellow frames show the areas to study.

3. 地殻変動の検出手法

本研究では、地震前後の SAR 画像における無被害建物の位置変化を検出することで、地殻変動量を求める手法を提案する。本来、位置合わせによる変化量の検出は、建物だけでなく小領域で行う研究が多かった。しかし、今回は津波により多数の木造建物等が流され、瓦礫の散乱で地表面の状況が激しく変化した。地震前後の同じエリアを正確にマッチングするために、本研究ではマッチング範囲を無被害建物に限定した。そのため、まず地震前後の強度画像からセグメンテーションにより建物抽出を行った。前後画像から抽出された建物を比較し、被害のない建物を検出する。検出された無被害建物とその周辺小領域に対して、面積相関法による位置合わせを行い、地殻変動量を抽出する。

i) セグメンテーション

通常、建物は壁のコーナー反射によって、ほかの地表物より高い後方散乱係数を示す。この特性を利用して、地震前後の画像からセグメンテーションに

よって建物のオブジェクトを抽出する。SAR 画像のヒストグラムを用いて、目視判読により建物と区別するための閾値を -1.7 dB に決定した。また、建物の大きさを考慮し、面積が 100 ピクセル(約 150m^2)以上のオブジェクトのみを建物とみなす。抽出された地震前後の建物オブジェクトを、カラー合成して Fig. 2(a)に示す。これより、地震前後の建物輪郭にズレが生じていることが確認できる。

ii) 無被害建物の検出

津波の被害を受けて、多くの木造建物が破壊された。地殻変動を計測するには、被害を受けていない建物の位置変化が必要である。そのため、抽出されたすべての建物オブジェクトから、無被害の建物オブジェクトを検出する。まず、地震前の画像から建物オブジェクトを含む長方形の小領域をターゲットエリアとして抽出する。そして、ターゲット画像の中心から、一回り大きい検索範囲を設定する。ターゲットエリアと検索範囲の一例を Fig. 2(b)に示す。もし、地震後の画像における検索範囲内に建物が存在すると、このターゲットとなる建物オブジェクトを被害なし建物と判断する。GPS 電子基準点の記録により、この地震における最大の地殻変動は 5.3m であるため、検索範囲はターゲットエリアから 5 ピクセル(6.25m)以内と設定する。

iii) 変動量の計測

地震前後の画像における無被害建物の位置移動量を地殻変動量と見なし、面積相関法により求める。抽出された無被害の建物オブジェクトとその周辺 3 ピクセル以内の小領域を、地震前の SAR 強度画像から抽出し、テンプレート(T)画像とする。さらに、ターゲット画像とその周辺の 5 ピクセル以内の範囲を、地震後の SAR 強度画像から抽出し、検索(I)画像とする。その一例を Fig. 3(a)に示す。T 画像を I 画像の上に移しながら、相関係数を計算し、マトリクスに記録する。位置変化がない場合、T 画像と I 画像の中心点が同じであるため、マトリクスの中心点が最も高い相関となる。建物が移動した場合、マトリクスの中心点から相関が最も高い位置への距離がこの建物の移動量となる。移動量をより正確に計測するために、T 画像と I 画像を Cubic Convention で 0.25 m/pixel にリサンプリングした。元画像の $1/5$ のピクセルサイズに変換することで、移動量をサブピクセル単位で計測することができる。建物オブジェクトの相関マトリクスの例を Fig. 3(b)に示す。この建物は東方向へ 2.75m 、南へ 1.25m 移動したと検出された。

4. 地殻変動の検出結果

地震前後の画像から電子基準点を含む 5 つのエリアを絞り、地殻変動量の検出を試みた(Fig. 1(d)). 北

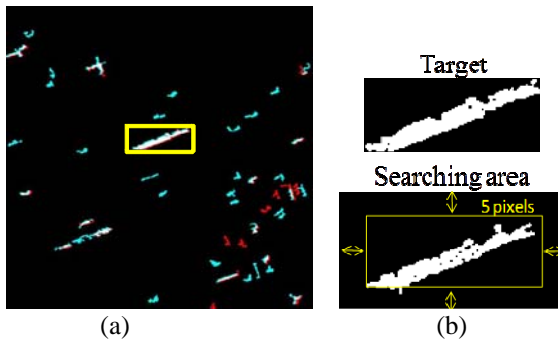


Fig. 2. Color composition of the pre- and post-event building images (a); the target building object from the pre-event building image and the searching area from the post-event building image (b)

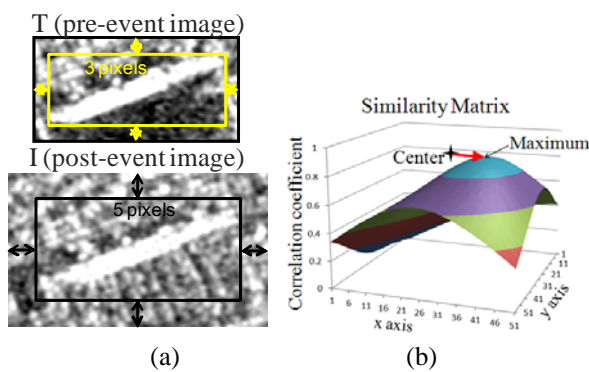


Fig. 3. A target area T from the pre-event SAR image, and the searching area I surrounding the target area from the post-event image (a); the similarity matrix for the target and searching areas (b).

から南へ、それぞれ東松島市、塩釜市、仙台市、名取市と亘理町を含む 4000 x 4000 ピクセル(25km²)の範囲である。そのうち、東松島市エリアに「矢本」基準点、名取市エリアに「名取」基準点がある。

Fig. 4(a)に示す東松島市エリアでは、579 棟の建物が地震前 SAR 画像から抽出された。地震後画像から、そのうち 371 棟が無被害建物と判断され、移動量の検出を行った。検出された地殻変動量の精度を保証するため、相関係数が 0.75 以上の建物についてのみ移動量を有効とした。そのため、241 棟の無被害建物に対して変動量を検出した。検出された変動ベクトルを Fig. 4(b)に示す。また変動距離と変動方向のヒストグラムを Fig. 4(c)に示す。この範囲で検出された地殻変動は、平均移動量が 3.65m で、方向は東から時計回りに 17.20° であった。

また、名取市エリアでは 452 棟建物が地震前画像から抽出され、地震後画像から 380 棟が無被害と判断された。そのうち、233 棟の移動量が計算され、平均移動量は 2.99m で、方向は東から時計回りに 11.01° であった。

Table I. Results of detected movements in 5 areas of Tohoku and central Tokyo

エリア名	建物数	検出された変動 (m)				変動方位 (degrees)	
		平均値	Std.	東へ	南へ	平均値	Std.
東松島市	241	3.65	0.47	3.47	1.07	17.20	6.09
塩釜市	1,392	3.29	0.45	3.18	0.79	13.95	5.33
仙台市	3,116	3.01	0.35	2.93	0.62	12.02	5.31
名取市	233	2.99	0.85	2.92	0.57	11.01	5.91
亘理町	393	2.84	0.39	2.78	0.48	9.59	7.19
東京都	1,443	0.32	0.27	0.03	0.001	-	-

すべてのエリアから検出された変動量を Table. 1 に示す。5 つのエリアから検出された変動量を比較すると、東松島市における地殻変動が最も大きく、南に行くほど小さくなる。また、変動方向も南に行くほどより東に近くなる。これらの傾向は、国土地理院が公開した GPS 基準点の記録と一致している。1 つエリア内に検出された変動ベクトルは、大半がほぼ同じ向きであるが、幾つかのエラーも存在する。これらのエラーは主に相関を計算する際、別の建物とマッチングされたものである。今回の地震による地殻変動は大きく、やや広い検索範囲にターゲットと近似した建物が存在する場合がある。今後、このようなエラーを除く手法を検討する必要がある。

5. 精度評価

提案した検出手法の有効性を検証するために、常時に撮影された東京都心部周辺の 2 時期 TSX 画像と、東北地方の GPS 基準点の記録を用いた。

東京都心部を撮影した 2 時期の画像は、2008 年 5 月 24 日と 2009 年 11 月 24 日のものである。観測角度ともに 41.8° で、撮影条件は東北地方の TRX 画像に近似している。2008 年から 2009 年の間、東京周辺では地震などの大きな地殻変動は発生していない。本研究で提案した手法を東京の画像ペアに適用し、誤差の検討を行った。2008 年の画像から 2041 棟建物が抽出され、1789 棟が 2009 年の画像とマッチングできた。そのうち 1433 棟に対し移動量の検出を行った。検出された移動量の平均値は 0.32m であった。これを 2 方向に分けると東方向への平均変動量は 0.03m、南方向へは 0.001m となり、限りなく 0 に近い結果が得られた。平均移動ベクトル長がやや大きい理由としては、画像解像度が原因の小さい変動が検出されたことによる。しかし、これらの変動はランダムな方向に分布し、平均を取ると移動していないことが分かった。この結果より、本研究で提案した手法は、サブピクセル精度で地殻変動量を検出できるものであると考えられる。

次に東北地方の画像範囲内にある GPS 電子基準点の記録と検出結果の比較を行った。3 次元の地殻

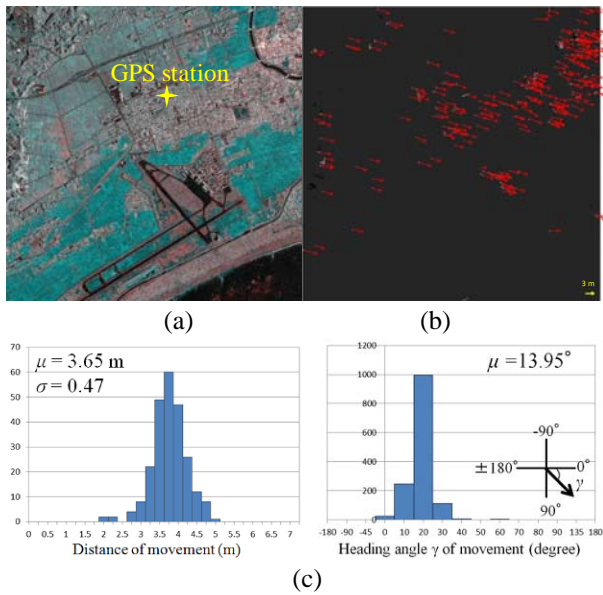


Fig. 4. Color composite of the TSX intensity images in Higashi-matsushima City (a) and the result of the detected displacement vectors (b); the histograms of the displacement and heading angle (c).

変動は東西方向ベクトル V_E , 南北方向ベクトル V_N と垂直方向ベクトル H に分けられる. この変動ベクトルと, 斜め観測を行う SAR 画像の関係を Fig. 5 に示す. 位置補正を行った TSX 強度画像上における 2 次元の変動量 M_E, M_N は, Eq. (1) で表される.

$$\begin{pmatrix} M_E \\ M_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cos \alpha / \tan \theta \\ 0 & 1 & \sin \alpha / \tan \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_E \\ V_N \\ H \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで, α は衛星の進行角度(北から時計周り)であり, θ は観測角度である.

矢本基準点の記録によると, 地震前後の画像が撮影された期間内で東南東に 4.07m の水平変位と 0.48m の沈下が発生した. 用いた TSX 画像の進行角度が 190.03° , 観測角度が 37.3° であるため, 理論上 SAR 画像上の変位は東へ 3.53m, 南へ 1.12m である. 東松島市で検出された変動量の平均値は, 東へ 3.47m, 南へ 1.07m であり, GPS 基準点の記録と非常に近い結果が得られた.

名取基準点で記録した地殻変動は東南東へ 3.18m の水平移動と 0.25m の沈下であった. Eq. (1) で計算された SAR 画像上の変位は, 東へ 2.91m, 南へ 0.64m となる. 名取市で検出された無被害建物の移動量の平均値は, 東へ 2.95m, 南へ 0.57m であり, これも大変近い値となった.

このように 2 地点の GPS 観測記録と SAR 画像から検出された地殻変動量は, 1 サブピクセル(0.25m) 以下の誤差となっていた.

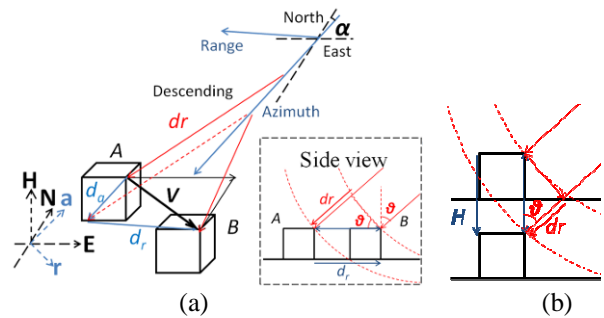


Fig. 5. Schematic views of the horizontal (a) and vertical displacements (b) in a SAR image.

6. まとめ

本研究では, 地震前後の TSX 強度画像における無被害建物の位置変化から地震による地殻変動量を検出する手法を提案した. 提案した手法を, 東北地方太平洋沖地震の前後に撮影された画像と, 常時の東京都心部の画像に適用した. 東北地方の画像から検出された地殻変動と GPS 基準点の記録を比較し, サブピクセル(0.25m)単位で変動を検出することができた. 今後は, TSX 画像から, 鉛直変位も含めた 3 次元の地殻変動量を推測するために, 撮影軌道や観測角度の違う SAR 画像を用いる予定である.

謝辞

この研究で用いた TerraSAR-X 画像は, SAR 技術応用研究会の H23 年度研究課題として, 株式会社パスコから提供されたものである.

【参考文献】

- 1) 国土地理院 : http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html#namelink3
- 2) Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Fiegl, and T. Rabaute: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, " *Nature*, No. 364, pp. 138-142, 1993.
- 3) Stramondo, S., F. R. Cinti, M. Dragoni, S. Salvi, and S. Santini: The August 17, 1999 Izmit, Turkey, earthquake: Slip distribution from dislocation modeling of DInSAR and surface offset, *Annals of Geophysics*, Vol. 45, No. 3/4, pp. 527-536, 2002.
- 4) Tobita, M., H. Suito, T. Imakiire, M. Kato, S. Fujiwara, and M. Murakami: Outline of vertical displacement of the 2004 and 2005 Sumatra earthquakes revealed by satellite radar imagery, *Earth Planets Space*, Vol. 48, No. 1, pp. e1-e4, 2006.
- 5) Matsuoka, M., and S. Kodama: Coseismic displacement measurement of the 2010 EL Mayor Mexico Earthquake by subpixel correlation from optical satellite images, *IEEE IGARSS 2011*, pp. 4010-4013, 2011.
- 6) Lee, J. S.: Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics, *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-2 (2), Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp. 165-168, 1980.