

# TerraSAR-X 強度画像を用いた東北地方太平洋沖地震における 3 次元地殻変動の検出

## Detection of three-dimensional crustal movements due to the 2011 Tohoku Earthquake from TerraSAR-X intensity images

○リュウ ウェン<sup>1</sup>・山崎文雄<sup>2</sup>・野中崇志<sup>3</sup>・笹川正<sup>3</sup>  
Wen Liu, Fumio Yamazaki, Takashi Nonaka and Tadashi Sasagawa

**Abstract** : Two pairs of pre- and post-event TSX images taken both in ascending and descending paths were used to detect three-dimensional (3D) crustal movements which were caused by the 2011 Tohoku earthquake. First, two sets of two-dimensional (2D) movements were detected by the authors' proposed method. Then the 3D movements were calculated from two sets of detected movements in a short time interval, according to the observing model of a SAR sensor. The method was tested on the TSX images covering the Sendai area, and its result was compared with the GEONET GPS observation records.

**Keywords** : crustal movement, the 2011 Tohoku earthquake, TerraSAR-X, three-dimensional displacement, GEONET.

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震とその余震や誘発地震により、東北地方を中心とした広域で大きな地殻変動が発生した。地殻変動量を把握するためには、国土地理院が設置したGPS電子基準点による観測と衛星画像を用いた検出の2つの手法がある。GPS基準点間は約20km間隔と離れているため、面的に地殻変動を把握するには衛星画像による検出が有効である<sup>1)</sup>。筆者らは地震前後のTerraSAR-X(TSX)強度画像を用いた2次元(2D)の地殻変動を抽出する手法を提案した<sup>2)</sup>。この手法を宮城県沿岸部の4時期の画像に適用し、0.5m以下の誤差で変動量を検出することができた。

本研究では、上昇軌道と下降軌道で撮影された地震前後の2組のTSX画像ペアを用いて、画像全域における3次元(3D)地殻変動の検出を試みた。検出結果を画像範囲内に設置された4ヶ所のGPS基準点の記録と比較し、手法の精度検証を行った。

### 2. 画像データと前処理

本研究では、Fig. 1(a)に示す仙台市を含む宮城県沿岸部を撮影した地震前後の4時期のTSX画像を用いた。上昇軌道で撮影した事前画像は2009年10月9日、事後画像は2011年4月1日のものである。下降軌道で撮影した事前画像は2010年10月26日、事後画像は2011年3月29日のものである。これらをFig. 1(b-e)に示す。4枚の画像はすべてStripMapモードでHH偏波により観測された。観測角度は上昇軌道が35.2°であり、下降軌道が21.47°である。画像はWGS48投影法のもとに地形補正を行った標準EECプロダクトであり、1.25 m/pixelの解像度によりサンプリングされたものを使用した。

地殻変動を検出する前に、デジタルナンバー(DN)

<sup>1</sup>学生会員 千葉大学大学院工学研究科; 日本学術振興会特別研究員JD2  
<sup>2</sup>正会員 千葉大学大学院工学研究科  
(所在地 〒263-8522 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)  
<sup>3</sup>正会員 株式会社パソコ衛星事業部

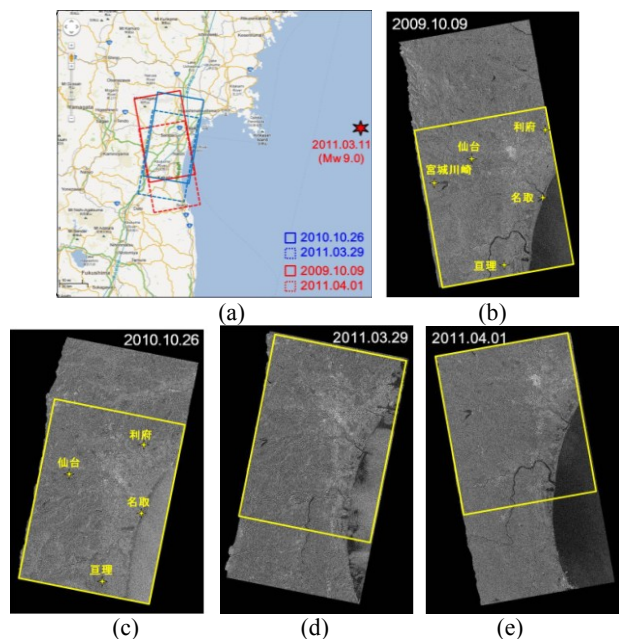


Fig. 1. Study area along the Pacific coast of Tohoku, Japan including 5 GPS stations (a); the pre-event TSX image taken on Oct. 9, 2009 (b) and Oct. 26, 2010 (c); the post-event TSX images taken on March 29 (d), and April 1 (e), 2011.

から Sigma Naught に変化し、Enhanced Lee フィルタを用いてスペックルノイズを除去した。上昇軌道の画像内には「利府」、「仙台」、「宮城川崎」、「名取」、「亘理」の5つのGPS電子基準点があり、下降軌道の画像にはこれらのうち「宮城川崎」を除く4つの基準点がある。

### 3. 2次元地殻変動の検出とその結果

4枚のTSX画像における共通範囲を2000×2000ピクセル(2.5×2.5 km<sup>2</sup>)のメッシュに分割した。各メッシュ内における無被害の建物を抽出し、その移動量の平均値を地殻変動量と見なす。1つのメッシュ内に5つ以上の建物移動量が検出されたもののみ、有効とする。上昇軌道と下降軌道のペアで検出された変位ベクトルをFig. 2(a)に示す。

上昇軌道のペアで検出された変動量は2.4 mから

3.9 m の範囲内にあり、下降軌道では 2.1 m から 3.4 m の範囲内であった。事後画像が撮影された間では、大きな変位が起きなかったため、2 つのペアにおける変動量は同じと考えられる。検出された変動量の差は、観測角度と観測方向によるものである。Fig. 2(a)に示す変位ベクトルを比較すると、上昇、下降軌道で検出された変動はほぼ同じ向きであった。GPS 電子基準点周辺のメッシュにおいて上昇、下降軌道で検出された各変動量を Table. I に示す。

#### 4. 3次元地殻変動の推定

既往の研究から、3次元地殻変動  $D$  と TSX 強度画像における2次元移動量  $M$  の関係は式(1)で表わされる。垂直方向の地殻変動は、東西と南北方向の画像上の移動量へと分解される。

$$\begin{pmatrix} M_E \\ M_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\cos\alpha/\tan\theta \\ 0 & 1 & \sin\alpha/\tan\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_E \\ D_N \\ D_Z \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $\alpha$  は衛星の進行角度(北から時計周り)であり、 $\theta$  は観測角度である。

1 ペアの画像からでは変換された 2D の変動量しか検出できない。しかし、上昇と下降軌道の結果を合わせることで、垂直方向の変動量( $D_Z$ )は画像上における東西と南北方向の移動量( $M_E$  と  $M_N$ )から求められる。理論上は  $M_E$  と  $M_N$  を用いて求められた  $D_Z$  は同じ数値になるが、実際では撮影時間差と 2D の検出結果に含まれる誤差の影響で、異なる変動量が得られた。観測モードによって、2D の検出において垂直方向の変動が東西方向へ多く変換されるため、 $M_E$  から求められた垂直変動は  $M_N$  により安定した結果となる。本研究では、式(2)を用いて  $M_E$  から求めた  $D_Z$  を使用する。

$$D_Z = \frac{M_{E_{As}} - M_{E_{Ds}}}{\cos\alpha_{Ds}/\tan\theta_{Ds} - \cos\alpha_{As}/\tan\theta_{As}} \quad (2)$$

東西方向における変動量  $D_E$  はこの  $D_Z$  を用いて得られる。南北方向における変動量  $D_N$  は上昇と下降軌道で異なる結果が得られたため、その平均値を使用する。検出された 3D の移動ベクトル図を Fig. 2(b) に示す。また、GPS 電子基準点周辺のメッシュで推

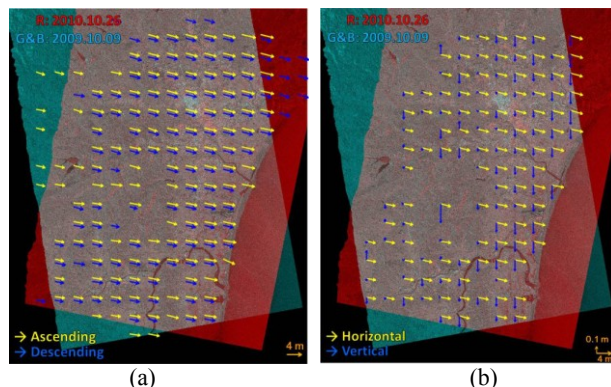


Fig. 2. Detected 2D displacement vectors in each sub-area from ascending and descending paths, respectively (a), and estimated 3D displacement vectors (b), overlapping on the color composite of the pre-event TSX images.

定された結果を Table. I に示す。

116 つのメッシュから 3D の移動量が推定された。水平方向の変動量は 2.47 m から 3.4 m の範囲内にあり、垂直方向では  $-0.3$  m から  $0.1$  m の範囲内であった。いくつか周辺と傾向がやや異なる垂直変動が見られるが、それらは 2D 変動検出の結果における誤差による影響と推定された。Table. I に示す GPS 基準点の観測記録と比較すると、基準点周辺で検出された結果は、水平方向で最大誤差  $0.25$  m、垂直方向で同  $0.22$  m であった。これより、サブピクセル単位で 3D の地殻変動を検出することができた。

#### 6. まとめ

本研究では、上昇と下降軌道で撮影された地震前後 2 時期の TSX 強度画像ペアを用いて、共通範囲における 3D 地殻変動量を求めた。検出された地殻変動と GPS 基準点の記録を比較すると、サブピクセル( $0.2$  m)単位の精度を有することが示された。

#### 【参考文献】

- 1) D. Massonnet, 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.
- 2) W. Liu, and F. Yamazaki: Detection of crustal movement from TerraSAR-X intensity images, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol.10, No.1, pp. 199-203, 2013. DOI: 10.1109/LGRS.2012.2199076.

Table I. Comparison of detected crustal movements in five sub-areas surrounding the GPS stations by the proposed method and the GPS records, to the 2D and 3D detections (unit: meter).

GPS station/ Component	Rifu			Sendai			Miyagi-kawasaki*			Natori*			Watari			
	E	N	Z	E	N	Z	E	N	Z	E	N	Z	E	N	Z	
2D As.	GPS	3.73	-0.87	—	2.97	-0.65	—	2.77	-0.49	—	3.66	-0.72	—	3.26	-0.62	—
	TSX	3.44	-0.95	—	2.74	-0.69	—	2.46	-0.59	—	3.47	-0.66	—	3.08	-0.54	—
	Error	-0.30	-0.082	—	-0.23	-0.04	—	-0.31	-0.10	—	-0.19	0.07	—	-0.18	0.08	—
2D Ds.	GPS	2.64	-0.71	—	2.41	-0.54	—	2.15	-0.43	—	2.79	-0.65	—	2.42	-0.43	—
	TSX	3.21	-0.69	—	2.58	-0.58	—	—	—	—	2.69	-0.38	—	2.67	-0.67	—
	Error	0.57	0.03	—	0.17	-0.04	—	—	—	—	-0.10	0.28	—	0.25	-0.24	—
3D	GPS	3.34	-0.86	-0.28	2.77	-0.61	-0.14	2.56	-0.52	-0.16	3.36	-0.77	-0.22	2.96	-0.54	-0.21
	TSX	3.36	-0.84	-0.06	2.68	-0.65	-0.04	—	—	—	3.19	-0.59	-0.20	2.93	-0.64	-0.11
	Error	0.02	0.02	0.22	-0.08	-0.04	0.10	—	—	—	-0.17	0.18	0.02	0.03	-0.10	0.10

\*indicates the first GPS record after the observation resumed.