

TerraSAR-X 強度画像を用いた 2011 年東北地方太平洋沖地震 における 3 次元地殻変動の検出

リュウ・ウエン^{*1}・山崎文雄^{*1}・松岡昌志^{*2}・野中崇志^{*3}・笹川 正^{*3}

Detection of three-dimensional geodetic displacements due to the 2011 Tohoku Earthquake
from TerraSAR-X intensity images

Wen LIU^{*1}, Fumio YAMAZAKI^{*1}, Masashi MATSUOKA^{*2}, Takashi NONAKA^{*3} and Tadashi SASAGAWA^{*3}

Abstract

The Mw 9.0 Tohoku Earthquake that occurred on March 11, 2011, off the Pacific coast of northeastern (Tohoku) Japan caused gigantic tsunamis, resulting in widespread devastation and crustal movements. In a previous study, we proposed a method for capturing the two-dimensional (2D) surface movements from pairs of temporal intensity images, based on the high orbit accuracy of the satellite TerraSAR-X (TSX). Detecting three-dimensional (3D) displacement from a single pair of TSX images is difficult, and thus in the present study we used three pairs of TSX images taken in the ascending and descending paths to estimate 3D crustal movements. First, the 2D crustal movements due to the 2011 Tohoku earthquake were detected from three respective pairs of images. We derived the relationship between the 3D displacement and the 2D converted movement in synthetic aperture radar (SAR) images according to the observation model and acquisition conditions of the SAR sensor. We then estimated the 3D movements by combining the detected 2D movements that occurred within a short time interval. We compared the results with the GEONET observation records and found that the results and records are consistent with each other.

Keywords : crustal movement, area-based correlation, SAR intensity image, regression analysis, GPS ground control station

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（東日本大震災）とその余震や誘発地震により、東北地方を中心として広域かつ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つの手法が考えられる。国土地理院は全国に1,200ヶ所に電子基準点を設置していたが、近隣する2つの基準点は約20km間隔と離れている¹⁾。そのため、電子基準点のデータのみで20km以下の高密度空間分布を捉えることは困難である。一方、人工衛星搭載の光学センサや合成開口レーダ（SAR）を用いるリモートセンシング技術の発展により、衛星画像から地殻変動を面的に検出することができるようになった。主にSAR画像の位相情報を用いた差分干渉処理と、画像間の位置ずれを計測することで変動量を求めるピクセルオフセット

ト法が使用されている。

差分干渉処理は、2枚の位相差画像を干渉させることでマイクロ波の波長相当の高精度で火山や地震による地殻変動を検出することができる。Massonnetら²⁾が1992年米国ランダース地震の地殻変動を、ERS-1衛星のSAR観測データを用いた干渉解析で検出できたことから、干渉SARが地表変動の観測手法として注目されるようになった。日本国内でも、島田³⁾、Ohkuraら⁴⁾や藤原ら⁵⁾が差分干渉技術を用いて1995年兵庫県南部地震における地殻変動を検出した事例がある。また、Murakamiら⁶⁾は1994年米国ノーズブリッジ地震における断層の変動を検出した。さらにレーダビームを前半と後半に分け、前方視と後方視でそれぞれ干渉処理を行うMAI (Multiple Aperture Interferometry) 手法もある⁷⁾⁸⁾。MAI手法は衛星進行方向における変動量が検出できるため、観測方向での干渉処理と組み合わせることで2次元の変動量が得られる。さらに上昇軌道と下降軌道の結果を組み合わせると、3次元での推定が可能に

(2013. 10. 12 受付, 2014. 4. 25 改訂受理)

^{*1} 千葉大学大学院工学研究科

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

^{*2} 東京工業大学大学院総合理工学研究科

〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G3-2

^{*3} 株式会社バスコ衛星事業部

〒164-0001 東京都中野区中野 4-10-1

^{*1} Graduate School of Engineering, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 263-8522, Japan

^{*2} Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 4259-G3-2 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8502, Japan

^{*3} Satellite Business Division, PASCO Corporation, 3F NAKANO Central Park East, 4-10-1 Nakano, Nakano-Ku, Tokyo 164-0001, Japan

なる⁹⁾¹⁰⁾。しかし、干渉処理で得られる地表変位には、植生や大気中の可降水量など観測時期の違いによるノイズが含まれる¹¹⁾。また、地表面の大変位によって干渉性が低下し、測定が不能となる場合もある¹²⁾。MAI手法は半分のビームしか使用しないため、相関が一般の干渉より低く、軌道条件はさらに厳しくなる。

一方、ピクセルオフセット法はSAR画像と光学画像の両方に適用できる手法である。Michelら¹³⁾はSAR強度画像にこの方法を適用し、1992年ランダース地震での地殻変動検出に成功した。飛田らは高精度マッチング手法を提案し¹⁴⁾、Kobayashiら¹⁵⁾はALOS/PALSAR画像から2008年中国四川地震の断層変位を検出した。Crippen¹⁶⁾、Leprinceら¹⁷⁾は光学衛星SPOTのパンクロマチック画像を、松岡・児玉¹⁸⁾はALOS衛星のPRISM画像を用いて地殻変動検出を行った。また、ピクセルオフセット法は地殻変動の検出のほか、氷河の流れ計測などにも有効である¹⁹⁾²⁰⁾。

しかし、東北地方太平洋沖地震では地殻変動の発生範囲が1枚の画像の撮影範囲よりはるかに広い。Fengら²¹⁾は3パスのEnvisat/ASARデータと6パスのPALSARデータを用いて、干渉処理による東北地方における変動縞を求めた。その結果、対象地域の全体において変動縞が検出されたため、不動点の設置が困難で相対的な変動しか求められなかった。また、東北地方の沿岸部では津波によって地表面が大きく変化し、通常のピクセルオフセット法では計測できない地域もある。そのため、筆者らは地震前後のTerraSAR-X (TSX) 強度画像を用いた2次元の地殻変動を抽出する手法を提案した²²⁾。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²³⁾。しかし、地震前後の同じ軌道の1ペアから得られる変動量は、実際に起きる3次元の変動量をグラウンドレンジ方向と衛星進行方向に変換した2次元の変動量である。そのため、上昇軌道と下降軌道で撮影されたSAR画像ペアを組み合わせることで、3次元の地殻変動を検出することが可能になる^{24)~26)}。本研究では、上昇軌道と下降軌道から撮影された地震前後の3組のTSX画像を用いて、画像全域における3次元の地殻変動の検出を試みた。得られた結果を画像範囲内に設置された3ヶ所の電子基準点の変位記録と比較し、提案手法の精度検証を行った。

2. 画像データと前処理

東北地方太平洋沖地震による広域の地殻変動を検出するために、本研究ではFig. 1(a)に示す宮城県を地震前後に撮影した6枚のTSX画像を用いた。上昇軌道から撮影された地震前の画像は2009年10月8日、地震後の画像は2011年3月31日のものである。下降軌道では異なる2つのパスから撮影された計4枚の画像を用いた。西のパスで撮影された事前画像は2010年10月26日、事後画像は2011年3月29日のものである。東のパスで撮影された事前画像は

2010年10月21日、事後画像は2011年4月4日のものである。各画像の撮影条件をTable 1に示す。上昇軌道をパスA、下降軌道をパスBとCとする。6枚の画像ともに、StripMapモードによりHH偏波で観測された。進行方向とレンジ方向の公称解像度はともに約3mである。画像は幾何補正後に地図投影された簡易オルソ化後のEnhanced Ellipsoid Corrected (EEC) プロダクトで、1.25m/pixelにリサンプリングされたものを使用した。

対象地域は6枚の画像の共通部分としてFig. 1に黒枠で示す。国土地理院が宮城県内に設置した18箇所の電子基準点(GNSS連続観測点)によって、2011年3月1日の記録を基準として4月1日までに観測された地殻変動量をFig. 1(b)に水平方向と鉛直方向のベクトルで示す。対象地域は地殻変動が大きかった仙台市を含む宮城県沿岸部であり、3m以上の水平変位と0.5m以上の沈下量が観測された。

地殻変動の検出を行う前に、後方散乱強度の校正とノイズの除去を行う必要がある。後方散乱強度の校正は、オリジナル画像のデジタル値(DN)から、地形と補正係数を用いて単位面積あたりの後方散乱を表す係数(σ^0)に変換する処理である。地震後の画像では、津波の浸水によって後方散乱係数の低い地域が地震前の画像よりも広く分布する。また、SAR画像にはスペckルノイズが含まれており、これを除去するためにEnhanced Leeフィルタ²⁷⁾を用いた。この際、詳細な地表面の情報を保存するために、最も小さい3×3ピクセルのウィンドウを使用した。

今回の地震による地殻変動の範囲は画像の撮影範囲より広い。本研究では軌道補正と地形補正後の位置情報を直接利用する。ドイツ宇宙センター(DLR)が公開した情報によると、本研究に用いたEEC画像の位置精度は、主に軌道精度と数値標高モデル(DEM)で決まる²⁸⁾。6枚のTSX画像は同一のDEM(SRTM-30)を用いて同じ手順で補正されているため、2枚の画像を比較する際には、DEMに起因する誤差はなくなる²⁹⁾。すなわち、本研究のTSX画像の相対位置精度は軌道精度のみ依存する。6枚の画像の軌道条件はすべて“Science”と呼ばれる高精度のGPS衛星情報に基づいた計算値であり、位置精度は20cm以内である。

前処理後の対象地域を撮影した6枚の画像をパスごとに合成したものをFig. 2に示す。ここで、下降軌道で撮影された前後画像における地面と水面の後方散乱係数の差は、上昇軌道で撮影されたものより大きい。そのため、下降軌道の合成図は上昇軌道のものより後方散乱係数が低下した沿岸部の湛水域が明確である。対象地域の面積は約内では「利府」、「名取」と「亶理」の3つの電子基準点が設置されている。

本研究で用いた地震前のTSX画像の撮影時期は異なり、パスAで撮影された画像がそのほかの画像と比べて1年ほど離れている。2010年3月14日の福島県沖地震や2010年7月4日の岩手県内陸南部地震を含め、2009年10月か

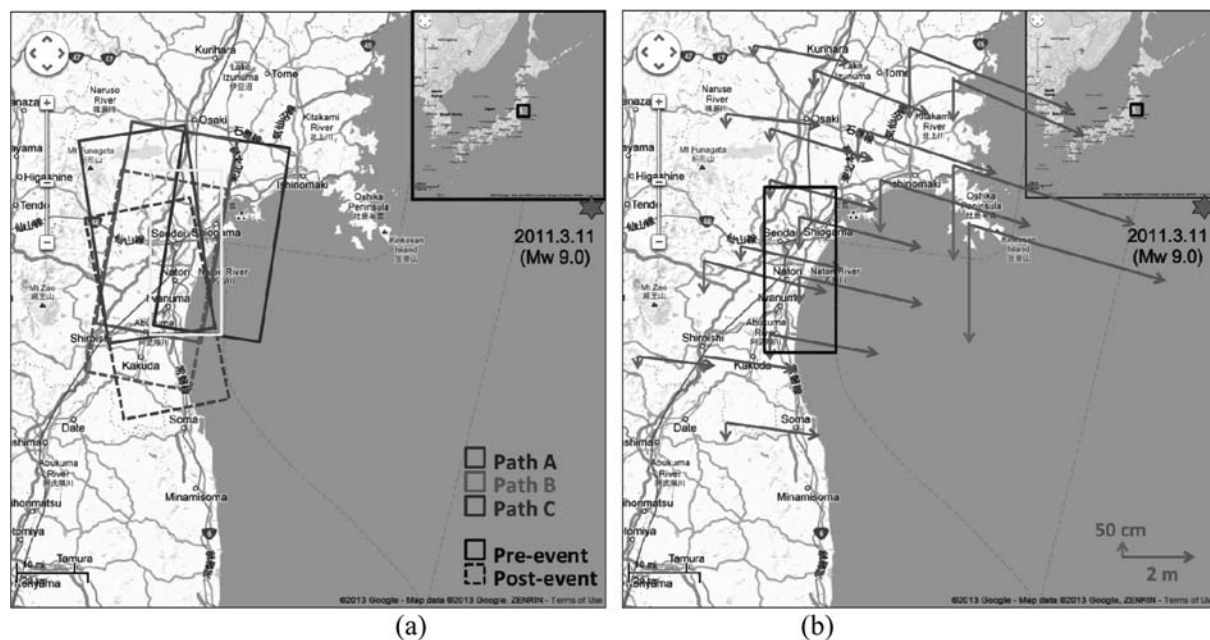


Fig. 1 Study area with six TerraSAR-X images in the Miyagi Prefecture (a); Displacement vectors observed by 18 GPS ground control stations in the Miyagi Prefecture in the period of March 1 to April 1, 2011 to the horizontal and vertical directions (b); the black frame shows the common target area used in this study.

Table 1 Acquisition conditions of the three pairs of TerraSAR-X images

Direction	Ascending		Descending			
	A		B		C	
Path	A		B		C	
Date	2009/10/09	2011/04/01	2010/10/26	2011/03/29	2010/10/21	2011/04/04
Incident angle	35.23°		21.47°		37.31°	
Heading angle (clockwise from the north)	349.79°		190.32°		190.03°	
Resolution (R x A) [m]	3.0 x 3.0		3.0 x 3.0		3.5 x 3.0	

ら 2010 年 11 月までの期間中に幾つかの地震が発生したが、宮城県内に設置された電子基準点の記録によると明確な地殻変動 (2 cm 以上) は観測されなかった。そのため、地震前画像における建物の位置に変化はないと見なした。また、地震後の 3 枚の画像ではそれぞれ約 3 日の違いがあった。電子基準点の記録を見ると、3 日間における地殻変動量はそれほど大きくはなく、本震による変動量に比べると無視できる程度のものであった。そのため、3 ペアの地震前後画像における地殻変動量はほぼ同じと見なすことにする。

3. 2 次元地殻変動の検出

この地震が引き起こした巨大津波によって東北地方の沿岸部は地表面の状況が大きく変化した。これによって、従来のピクセルオフセット法では、画像間のマッチングが出来なくなるなど変位量を求められない地域もある。そこで

著者らは、無被害の建物の位置ずれを利用することで地殻変動を検出する手法を提案した²²⁾。本研究では、まず提案した手法を用いて、TSX 画像から 2 次元の地殻変動を検出した。衛星の高精度の軌道情報を用いて補正された強度画像を使用することで、絶対的な変動量を検出することができる。

2 次元の地殻変動を検出するために、用いた 6 枚の TSX 画像を 2000×2000 ピクセル (2.5×2.5 km²) 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の変位量を検出し、それらを平均することでメッシュ単位の地殻変動量を推定した。建物の移動量の検出は以前提案したサブピクセルレベルの面積相関法で行った。まず、地震前後の TSX 画像から後方散乱強度が -2.0 dB 以上のピクセルをオブジェクト化し、これを建物と見なす。本研究では、建物の輪郭を正確に抽出する必要はないため、光学画像を参照して建物の後方散乱域を概ね抽出できることを確認した -2.0 dB を閾値として使用した。地震前後画像から近い位

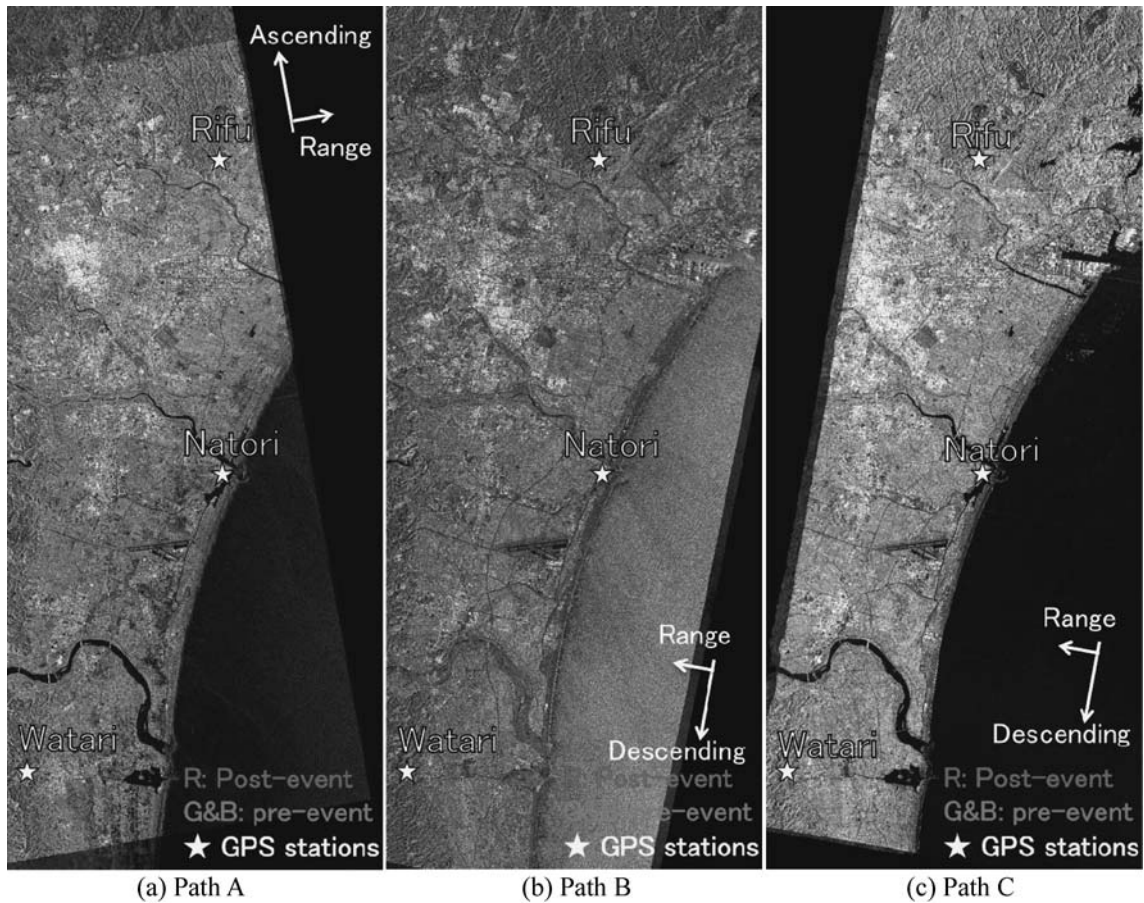


Fig. 2 Composites of the three pairs of pre- and post-event TSX images in Paths A (a), B (b), and C (c) after the pre-processing steps.

置で建物のオブジェクトが抽出されたら、それを無被害建物と判定する。無被害建物の移動量を検出するために、その建物の周辺を含む地震前の TSX 強度画像をサンプルエリアとし、同じ中心点でサンプルエリアより大きい検索範囲を地震後の強度画像から切り出す。サンプルエリアを検索範囲に重ねて、その中を移動させながら、(空間)相関係数を計算する。各位置で得られる相関係数から、相関マトリックスを構築する。地殻変動が発生しない場合、同じ中心点で切り出したサンプルエリアと検索範囲の最大相関値はマトリックスの中心点である。しかし、地殻変動が発生した場合、最大相関値の位置は中心点から離れていき、そのずれ量が建物の移動量となる。その一例を Fig. 3 に示す。サンプルエリアと検索範囲を 0.25m/pixel に Cubic Convolution 法でリサンプリングすることで、サブピクセルレベルの移動量を検出することができる。

既往の研究では 4000×4000 ピクセルの 5km メッシュを使用し、最大相関係数が 0.8 以上の 10 棟以上の建物の移動量を検出することを条件とした。ここで、相関係数の閾値を 0.7 にした場合には同一建物ではない誤検出が発生し、0.9 にした場合には検出できる無被害建物棟数が大幅に減少したため、0.8 を無被害建物の検出閾値に決定した。本研究では詳細な変動量を検出するため、より小さい 2.5 km

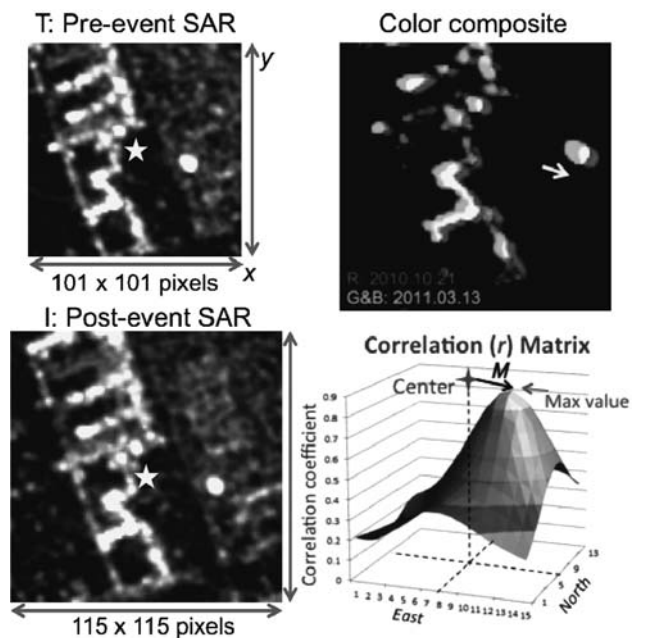


Fig. 3 Pre- and post-event TerraSAR-X images around a target building (left) and their color composite (upper right). The displacement of the target building (lower right) is obtained by the correlation matrix, which was calculated by shifting the smaller pre-event image over the larger post-event image.

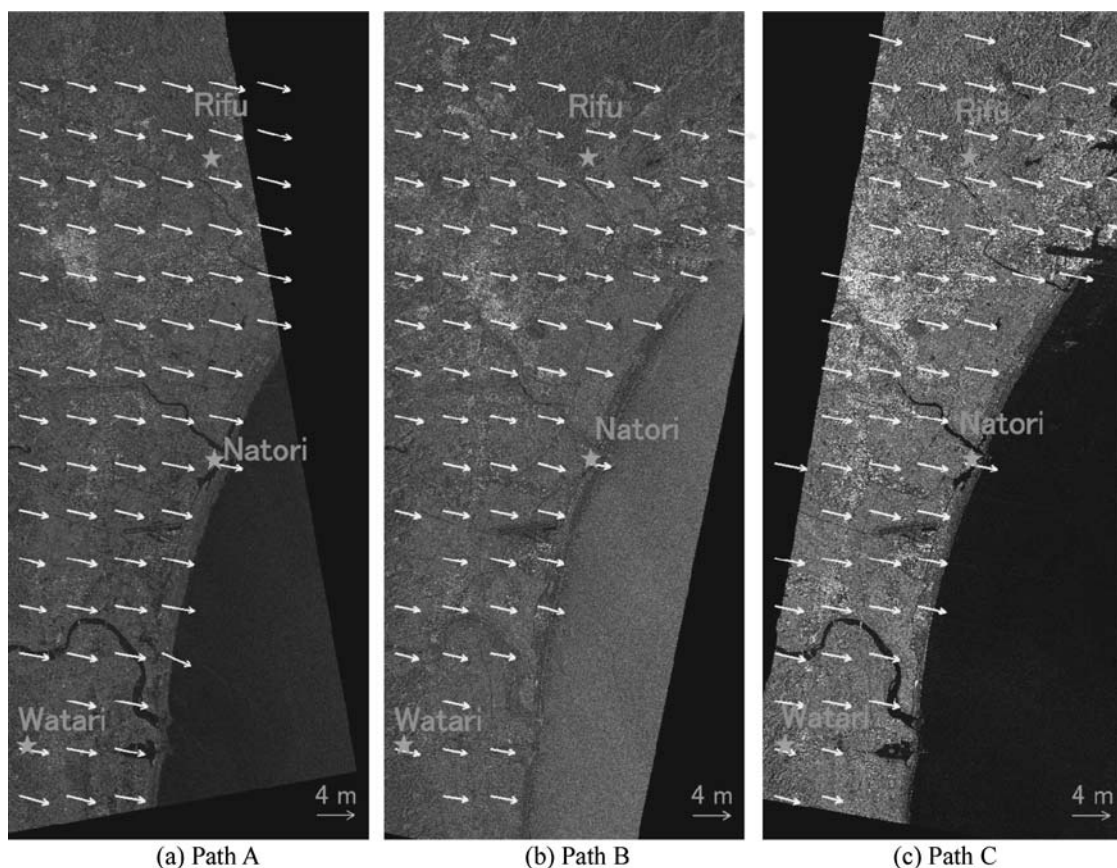


Fig. 4 Detected 2D displacement vectors in each sub-area plotting on the pre-event TSX images of Paths A (a), B (b), and C (c).

メッシュを使用した。1つのメッシュ内に5棟以上の建物の移動量が検出されれば有効とすることにし、そのメッシュ内における移動量の平均値を地殻変動と見なすことにした。各パスの地震前後ペア画像から得られた2次元の地殻変動量を Fig. 4 にベクトルで示す。

上昇軌道のパス A から 76 個のメッシュにおける地殻変動量が検出された。下降軌道のパス B からは 77 個のメッシュ、パス C から 70 個のメッシュにおける地殻変動量が検出された。撮影期間中における地殻変動量はほぼ同じであるが、パス B の観測角度は 21 度と、パス A と C の 37 度より小さいため、検出された地殻変動量の値もパス A と C より小さかった。また、3つのパスから得られた変動量は沿岸北部において最も大きく、内陸や南に行くほど小さくなる傾向が見られた。この傾向は、国土地理院の電子基準点の観測データとも一致している。地殻変動が検出できなかったメッシュは、主に建物が少ない地域や、津波被害が大きく無被害建物が少ない地域であった。3つの電子基準点が設置されていたメッシュにおける検出結果を Table. 2 に示す。

4. 3次元地殻変動の推定

実際に起きる3次元の地殻変動量と斜め観測で撮影されたTSX画像上における2次元の移動量の関係は、Fig. 5で

Table 2 Comparison of the detected 2D displacements from the three pairs results with those converted from the GPS records (unit: meter)

GPS stations		Rifu		Natori		Watari	
		East	North	East	North	East	North
A	Observation	3.73	-0.87	3.66	-0.72	3.26	-0.62
	TSX	3.44	-0.95	3.47	-0.66	3.08	-0.54
	Error	-0.31	-0.08	-0.19	0.07	-0.18	0.08
B	Observation	2.64	-0.71	2.79	-0.65	2.42	-0.43
	TSX	3.21	-0.69	2.69	-0.38	2.67	-0.67
	Error	0.57	0.03	-0.10	0.28	0.25	-0.24
C	Observation	2.91	-0.77	3.03	-0.70	2.67	-0.48
	TSX	3.35	-0.80	3.49	-0.69	3.11	-0.58
	Error	0.44	-0.03	0.46	0.01	-0.18	0.10

示される。まず、3次元変位量 (D_E, D_N, D_Z) を SAR センサの観測方向における変化 L_S と進行方向 L_A で捕らえる。これは、地表面に投影した東西と南北方向における変位 (M_E, M_N) に分割される。それらの関係は式 (1-2) で表される。

$$\begin{pmatrix} L_S \\ L_A \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha \cdot \sin\theta & \sin\alpha \cdot \sin\theta & -1/\cos\theta \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_E \\ D_N \\ D_Z \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} M_E \\ M_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\alpha & \cos\alpha \\ \cos\alpha & \sin\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L_S/\sin\theta \\ L_A \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\cos\alpha/\tan\theta \\ 0 & 1 & \sin\alpha/\tan\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_E \\ D_N \\ D_Z \end{pmatrix} \quad (2)$$

ここで、 α は衛星の進行方位角 (北から時計周り) であり、 θ は観測角度である。

1つのペア画像で得られる2次元の地殻変動量 M_E と M_N から、式 (1) によって3つの未知数を持つ3次元地殻変動量を求めることは一般に困難である。しかし、2ペア以上の検出結果があれば式が4つ以上となり、3つの未知数を回帰により求めることが可能となる。

まず、2ペアの2次元の変位推定結果から3次元の変位を推定した。式(2)に2つのペアの結果を代入すると式(3)を得られる。

$$\begin{pmatrix} M_{Ea} \\ M_{Na} \\ M_{Eb} \\ M_{Nb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} D_E + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} D_N + \begin{pmatrix} -\cos\alpha_a/\tan\theta_a \\ \sin\alpha_a/\tan\theta_a \\ -\cos\alpha_b/\tan\theta_b \\ \sin\alpha_b/\tan\theta_b \end{pmatrix} D_Z \quad (3)$$

3つの未知数(3次元変位)より式の数(4)が多いため、本研究では回帰分析を使用して最も適した未知数の値を求めることにする。3つのパスから、AとB、AとC、BとC、3通りの組み合わせで回帰分析を行い、それぞれの推定結果を Fig. 6 に示す。3つの結果を比較すると、パスAとBから得られた変位量をもっとも電子基準点の記録と整合していた。各組み合わせで得られた水平変位はほぼ同じであったのに対して、パスAとCから推定された垂直変位は0に近く、パスBとCから推定された沈下は1mほどの大きな値であった。そのため、パスBとCの垂直ベクトルのスケールは、ほかと異なったもので表示している。パスAとC、BとCの組合せから推定された垂直変位が不安定となった理由としては、係数に含まれる観測角度または進行方位角のいずれか1つが、ほぼ近い値であることが考えられる。それによって、垂直変位の推定が2次元推定の誤差に大きく影響され、不安定な結果になったものと思われる。3つの電子基準点周辺で推定された結果を Table 3 に示す。パスBとCから推定された垂直変位は、パスAとBからの推定結果の3倍程度の大きさであり、互理観測点においては符号が逆(上昇)になっている。

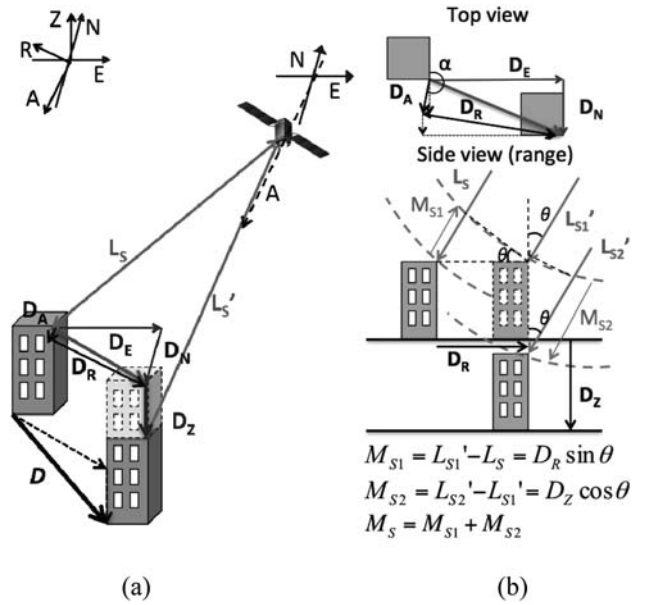


Fig. 5 3D view (a) and 2D top and side views (b) of the relationship between the three-dimensional movement and SAR observation

次に、3つの2次元推定結果を全部使用した3次元推定を行う。式(2)に3組の結果を代入すると式(4)が得られる。

$$\begin{pmatrix} M_{Ea} \\ M_{Na} \\ M_{Eb} \\ M_{Nb} \\ M_{Ec} \\ M_{Nc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} D_E + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} D_N + \begin{pmatrix} -\cos\alpha_a/\tan\theta_a \\ \sin\alpha_a/\tan\theta_a \\ -\cos\alpha_b/\tan\theta_b \\ \sin\alpha_b/\tan\theta_b \\ -\cos\alpha_c/\tan\theta_c \\ \sin\alpha_c/\tan\theta_c \end{pmatrix} D_Z \quad (4)$$

3つのパスから検出された有効なメッシュが異なるため、少なくとも2つのパスから有効メッシュとして判定されたメッシュに対して推定を行った。先ほどの推定結果では、観測角度のみ異なるパスBとCからの結果が不安定であったことから、2パスからの推定は上昇軌道と下降軌道の組み合わせでのみ行った。推定された3次元変位を Fig. 7(a) にベクトルで示すが、73個のメッシュにおいて地殻変動量を推定することができた。そのうち、52個のメッシュでは3ペアの検出結果を使用して推定を行った。推定された3次元変位は、Fig. 6 (a) に示すパスAとBから検出されたものと近い結果であった。水平と垂直方向における推定された変位量の大きさをそれぞれレインボーカラー

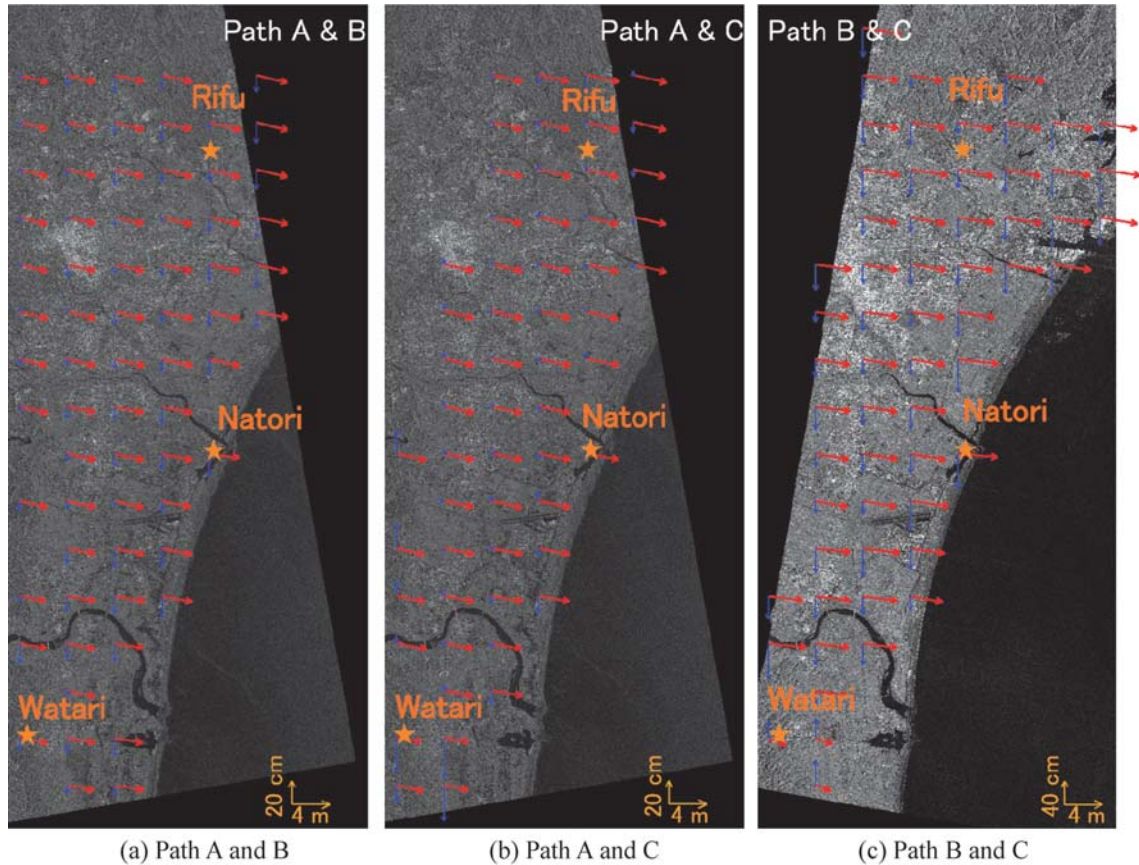


Fig. 6 Estimated 3D displacement vector in each sub-area plotting on the pre-event TSX images using the combination of Paths A and B (a), Paths A and C (b), Paths B and C (c). Red and blue arrows show the horizontal and vertical displacements, respectively.

で表示したものを Fig. 7 (b)・(c) に示す。いずれの方向においても、沿岸北部の変位量がもっとも大きく、内陸と南に行くほど小さくなり、これらは 2 次元の変位ベクトルと同じ傾向であった。3 つの電子基準点を含むメッシュ（または一番近いメッシュ）で推定された 3 次元推定結果も Table 3 に併せて示す。

5. 検出と推定精度の検証

電子基準点の観測データを用いて、2 次元推定変位結果と 3 次元推定変位結果を検証する。GPS 観測データの 2 時期間の変動量を得るために、地震後画像の撮影日における位置から地震前画像の撮影日における位置までの距離と方向を楕円体 GRS80 をもとに計算した。TSX 画像は測地系 WGS84 に投影されているため、画像から検出された変動量と観測データの変動量は測地系においてほぼ一致する。2 次元結果と比較するため、電子基準点の観測データを式 (1) を用いて TSX 画像上における 2 次元変位へと変換した。さらに、この変換した観測データと電子基準点周辺で検出された結果を Table 2 で比較する。各パスから検出された東西方向変位における観測誤差は、南北方向のものより大きかった。東西方向における最大観測誤差が出た

のはパス B から検出された利府電子基準点周辺であり、0.57m であった。南北方向における最大観測誤差もパス B からの名取電子基準点周辺であり、0.28m であった。東西方向の平均誤差は 0.30m であり、南北方向の平均誤差は 0.11m であった。どちらも 3m の地上解像度に比べて 1/10 程度のレベルであった。

2 つのパスの検出結果から推定された 3 次元変位量と 3 つのパスから推定された変位量に関しても、電子基準点の観測データと比較を Table 3 に示す。水平と垂直方向の 3 次元における観測誤差を平均二乗誤差 (RMSE) で評価した。2 つのパスの結果から推定した場合、パス B と C から推定された変位の誤差が最も大きかった。そして、2 つのパスからの推定結果と 3 つのパスの推定結果を比較すると、利府と亶理電子基準点周辺ではパス A と B から推定された変動量の誤差が最も小さく、名取電子基準点周辺では 3 つパスから推定された変位量の誤差が最も小さかった。パス A と B は、観測角度と進行方位角がともに異なるため、最も小さい誤差で 3 次元変位を推定することができた。この結果から、多数のパスからの結果を用いることで推定結果の客観性が高まるものの、誤差の大きい結果を使用することで推定誤差が大きくなる場合があることがわかった。

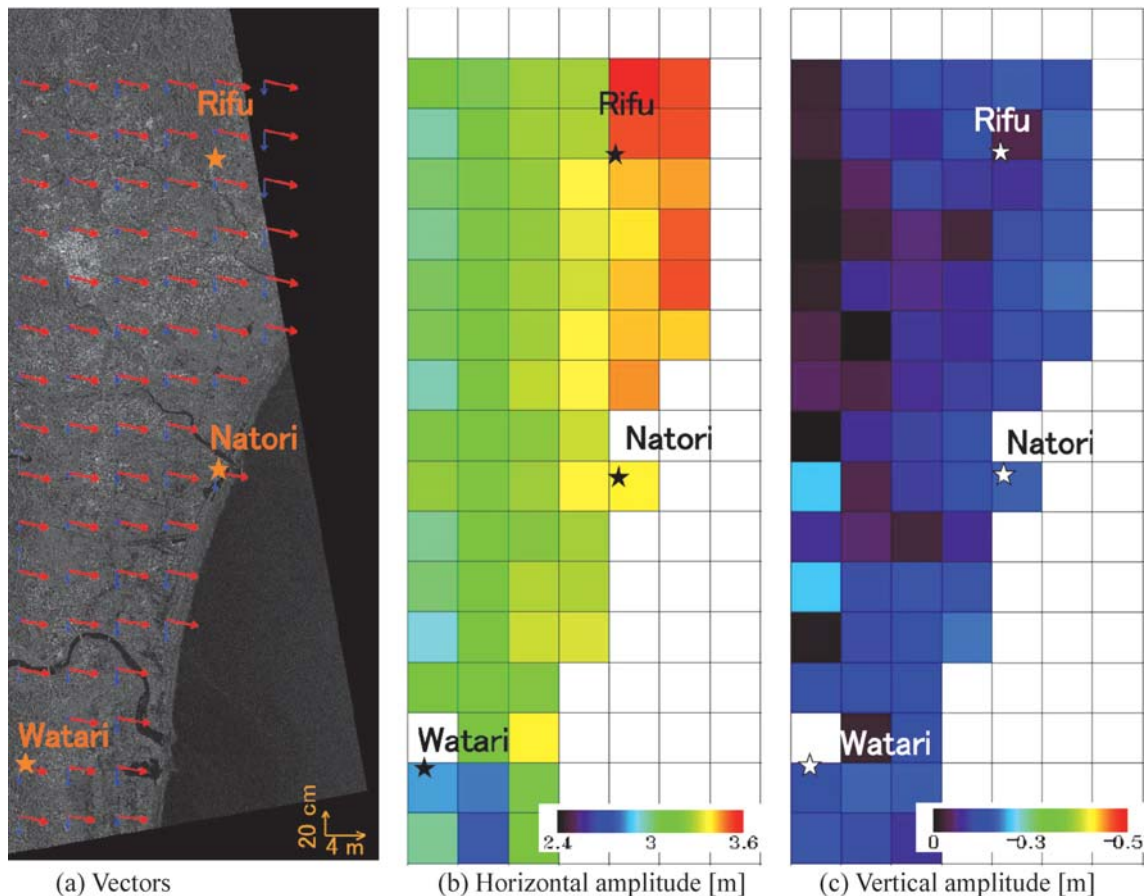


Fig. 7 Estimated 3D displacement vector in each sub-area plotting on the pre-event TSX image taken on Sep. 21, 2010 (a), where the red and blue arrows show the horizontal and vertical displacements, respectively; displacement amplitude in the horizontal (b) and vertical (c) directions shown on a rainbow color scale.

2011年3月1日から4月30日まで3つの電子基準点での観測データと3つのパスのTSX画像から推定変動量をFig. 8に比較する。Table 3とFig. 8に示すように、本研究の推定手法による地殻変動量は電子基準点の観測記録と近い結果が得られた。3地点の観測記録と画像から推定変動量の平均誤差は、東西方向に0.09m、南北方向に0.15m、垂直方向に0.13mであった。どの方向においても最大誤差は0.3m以下であり、1ペアによる2次元地殻変動の検出結果より小さい誤差であった。本研究では同じパスにおける2時期画像の位置合わせは、衛星の軌道情報のみ依存しているため、この小さい誤差はTSXのEEC画像における高い位置精度が要因と考えられる。したがって提案する手法は、無被害の堅牢な建物が存在する地域において、地殻変動を含む大規模な地盤変位の把握に有効なものと考えられる。

6. ま と め

既報では、2時期のSAR強度画像を比較して、無被害建物の位置の変化から2次元の地殻変動量を検出する手法を提案したが、本報では、異なる3つのパスから撮影された

6枚の地震前後画像にこの方法を適用し、2011年東北地方太平洋沖地震の前後の地殻変動の面的な分布推定を試みた。TerraSAR-X画像の位置情報を直接的に利用することで、干渉解析では得られない絶対変位を得ることができる。空間相関の計算領域を無被害建物の周辺に限定することで、津波によって地表面が激しく変化した地域においても変位の検出が可能である。電子基準点の記録と比較すると、2次元変位の検出誤差は0.3m程度であり、3mの地上分解能の1/10程度であった。検出誤差の原因としては、軌道情報とDEMを用いた位置情報の系統誤差、および地上解像度の影響が考えられる。しかし、本研究に用いた画像は高精度な軌道(“Science”)補正後のものであったため、地上解像度の大きさが主たる誤差の原因と考えられる。したがって、より高解像度のSpotlightモード画像や今後打ち上げられるALOS-2画像を用いることで、より小さい誤差での変位検出が期待できる。

次に2組のパスおよび3組のパスの地震前後データによる2次元の変位検出結果に基づいて、回帰分析を用いて実際の3次元地殻変動量の推定を行った。2つのパスからの推定結果では、上昇と下降軌道を用いた組み合わせが、同軌道で観測角度の異なるペアより誤差が小さかった。3つ

Table 3 Comparison of the estimated 3D displacements from the different combination with those from GPS records (unit: meter)

Path		A&B	A&C	B&C	3 sets	GPS
Rifu	East	3.36	3.46	3.69	3.41	3.34
	North	-0.80	-0.93	-0.73	-0.83	-0.86
	Vertical	-0.06	0.01	-0.18	-0.04	-0.28
	RMSE	0.13	0.19	0.22	0.15	-
Natori	East	3.19	3.48	4.22	3.34	3.36
	North	-0.45	-0.67	-0.33	-0.52	-0.77
	Vertical	-0.2	0.01	-0.59	-0.16	-0.22
	RMSE	0.21	0.16	0.60	0.15	-
Watari	East	2.93	2.66	1.91	2.79	2.96
	North	-0.57	-0.48	-0.73	-0.55	-0.53
	Vertical	-0.11	-0.30	0.30	-0.14	-0.24
	RMSE	0.08	0.18	0.69	0.11	-

のパスからの推定結果では、2つのパスからのものより安定した推定結果が得られた。推定結果を電子基準点の記録と比較すると、3つのうち、「利府」と「亘理」周辺では2つのパスから推定した時に誤差が小さく、「名取」周辺では3つのパスの結果から推定した変位の誤差が最も小さかった。観測角度と進行方位角のうち1つでも条件が近いと、検出結果の観測誤差が変位推定に大きく影響する。そのため、2つの条件がともに異なるパス A と B からの推定結果が最も精度が高かった。しかし、パス B と C を除き、そのほかの組み合わせにより推定した結果の RMS 誤差は 0.2 m 以下であった。

本研究で用いた手法では、建物が存在しない地域への適用が難しく、対象範囲における一部地域では地殻変動量を検出できなかった。今後は、検出できない地域に対しては、従来のピクセルオフセット法を補完的に用いることで、広域の地殻変動推定を行いたい。また、計算の順番を入れ替えて、建物単位で3次元変位を推定し、画像全域に拡張することで精度が向上するかどうか試してみたいと考えている。

謝辞：本研究で使用した TerraSAR-X 画像は、千葉大学との共同研究において株式会社パソコから提供されたものである。TerraSAR-X 画像の所有権は Infoterra GmbH にある。

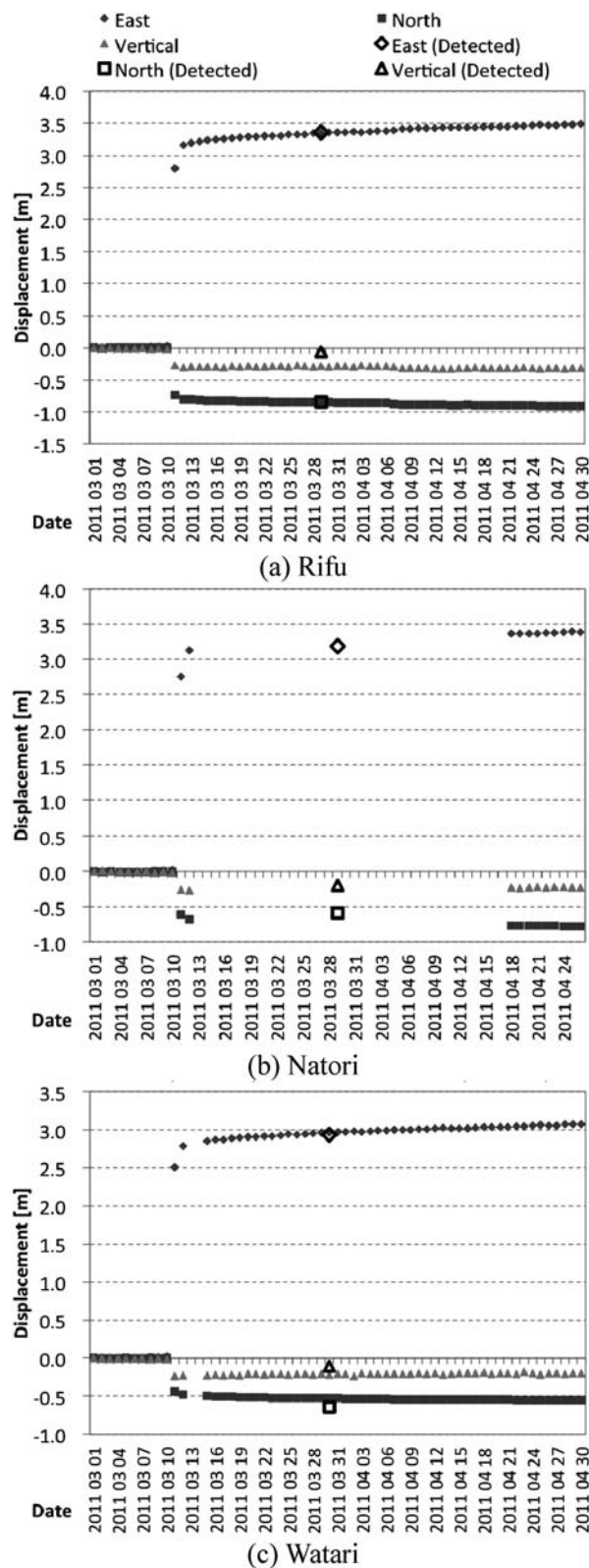


Fig. 8 Comparison of the movements observed at Rifu (a), Natori (b), and Watari (c) GPS ground control stations and the results estimated for their surrounding sub-areas.

引用文献

- 1) 国土地理院 : http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html#namelink3 (2013. 10. 2)
- 2) D. Massonnet, M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Feigl and T. Rabaute : The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364, pp. 138-142, 1993.
- 3) 島田政信 : 地震解析中間報告, 阪神・淡路大震災関連調査, 兵庫県南部地震災害調査報告, 地球観測委員会・宇宙開発事業団・(財)リモート・センシング技術センタ, pp. 1-96, 1995.
- 4) H. Ohkura, T. Jitsufuchi, T. Matsumoto and Y. Fujinawa : Application of SAR data to monitoring of earthquake disaster, *Advances in Space Research*, 19 (9), pp. 1429-1436, 1997.
- 5) 藤原 智, 小沢慎三郎, 村上 亮, 飛田幹男 : 干渉 SAR によって得られた地表面変位の勾配解析による 1995 年兵庫県南部地震の地表断層位置推定, 地震第 2 輯, 53, pp. 127-136, 2000.
- 6) M. Murakami, M. Tobita, S. Fujiwara and T. Saito : Crustal deformations for 1994 Northridge, California, earthquake detected by interferometric JERS 1 synthetic aperture radar, *Journal of Geophysical Research*, 101 (B4), pp. 8605-8614, 1996.
- 7) N. B. D. Bechor and Howard A. Zebker : Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair, *Geophysical Research Letters*, 33, L16311, 2006.
- 8) H.-S. Jung, J.-S. Won and S.-W. Kim : An improvement of the performance of Multiple-Aperture SAR Interferometry (MAI), *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 47 (8), pp. 2859-2869, 2009.
- 9) H. S. Jung, Z. Lu, J. S. Won, M. P. Poland and A. Miklius : Mapping three-dimensional surface deformation by combining Multiple-Aperture Interferometry and conventional interferometry : Application to the June 2007 Eruption of Kilauea Volcano, Hawaii, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8 (1), pp. 34-38, 2011.
- 10) J. Hu, Z. W. Li, X. L. Ding, J. J. Zhu, L. Zhang and Q. Sun : 3D coseismic Displacement of 2010 Darfield, New Zealand earthquake estimated from multi-aperture InSAR and D-InSAR measurements, *Journal of Geodesy*, 86 (11), pp. 1029-1041, 2012.
- 11) 田中明子, 中野 司 : SAR インターフェロメトリーによる地殻変動量検出における諸問題, 地震第 2 輯, 50, pp. 89-99, 1997。
- 12) 小林知勝, 飛田幹男, 村上 亮 : 局所的大変位を伴う地殻変動計測のためのピクセルオフセット解析, 測地学会誌, 57 (2), pp. 71-81, 2011.
- 13) R. Michel, J.-P. Avouac and J. Taboury : Measuring ground displacements from SAR amplitude image : application to the Landers earthquake, *Geophysical Research Letters*, 26 (7), pp. 875-878, 1999.
- 14) 飛田幹男, 藤原 智, 村上 亮, 中川弘之, P. A. Rosen : 干渉 SAR のための高精度画像マッチング, 日本測地学会誌, 45, pp. 297-314, 1999.
- 15) M. Kobayashi, Y. Takada, M. Furuya, M. Murakami : Locations and types of ruptures involved in the 2008 Sichuan earthquake inferred from SAR image matching, *Geophysical Research Letters*, 36 (7), 2009.
- 16) R. E. Crippen : Measurement of sub resolution terrain displacements using SPOT panchromatic imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 15 (1), pp. 56-61, 1992.
- 17) S. Leprince, S. Barbot, F. Ayoub and J.-P. Avouac : Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, Application to ground deformation measurements, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 45 (6), pp. 1529-1558, 2007.
- 18) G. Feng, X. Ding, Z. Li, J. Mi, L. Zhang and M. Omura : Calibration of an InSAR-Derived coseismic deformation map associated with the 2011 Mw-9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9 (2), pp. 302-306, 2012.
- 19) D. Scherler, S. Leprince and M. R. Strecker : Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery- Accuracy improvement and quality assessment, *Remote Sensing of Environment*, 112 (10), pp. 3806-3819, 2008.
- 20) N. Riveros, L. Euillades, P. Euillades, S. Moreir and S. Balbarani : Offset tracking procedure applied to high resolution SAR data on Viedma Glacier, Patagonian Andes, Argentina, *Advances in Geoscience*, 35, pp. 7-13, 2013.
- 21) M. Matsuoka and S. Kodama : Coseismic displacement measurement of the 2010 El Mayor, Mexico earthquake by subpixel correlation from optical satellite images, *IGARSS 2011*, pp. 4010-4013, July. 2011.
- 22) 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, 12 (4), pp. 3-13, 2012.
- 23) W. Liu, F. Yamazaki : Detection of Crustal Movement from TerraSAR-X intensity images for the 2011 Tohoku, Japan Earthquake, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10 (1), pp. 199-203, 2013.
- 24) M. Tobita, M. Murakami, H. Nakagawa, H. Yarai, S. Fujiwara and P. A. Rosen : 3-D surface deformation of the 2000 Usu eruption measured by matching of SAR images, *Geophysical Research Letters*, 28 (22), pp. 4291-4294, 2001.
- 25) Y. Fialko, M. Simons and D. Agnew : The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations, *Geophysical Research Letters*, 28 (16), pp. 3063-3066, 2001.
- 26) J. Catalão, G. Nico, R. Hanssen and C. Catita : Merging GPS and atmospherically corrected InSAR data to map 3-D terrain displacement velocity, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 49 (6), pp. 2354-2360, 2011.
- 27) A. Lopes, R. Touzi and E. Nezry : Adaptive Speckle Filters and Scene Heterogeneity, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28 (6), pp. 992-1000, 1990.
- 28) M. Eineder, T. Fritz, J. Mittermayer, A. Roth, E. Borner, H. Breit and B. Brautigam : TerraSAR-X ground segment basic product specification document, TX-GS-DD-3302, Issue 1.7, pp. 31-32,

2010.
29) H. Breit, T. Fritz, U. Bals, M. Lachaise, A. Niedermeier and M. Vonavka : TerraSAR-X SAR processing and products, IEEE

Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48 (2), pp. 727-739, 2010.

[著者紹介]

●リュウ・ウェン



所属：千葉大学大学院工学研究科 建築・都市科学専攻。2008 年千葉大学工学部都市環境システム学科卒。2010 年千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻博士前期課程修了，2013 年同専攻博士後期課程修了，博士（工学）。2011～2013 年千葉大学日本学術振興会特別研究員（DC2），

2013～2014 年東京工業大学日本学術振興会外国人特別研究員（PD）。2014 年より千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻助教。衛星データを用いた都市情報の収集と災害後の被害把握に関する研究に従事する。日本リモートセンシング学会，日本地震工学会，土木学会，IEEE に所属。

E-mail : wen.liu@chiba-u.jp

●山崎 文雄（ヤマザキ フミオ）



所属：千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻教授。1978 年東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻修士課程修了。1978 年清水建設株式会社入社。1987 年東京大学工学博士。1989 年東京大学生産技術研究所助教授。2001 年アジア工科大学院教授（JICA 長期専門家）。2003 年 12 月より現職。専門分野は，都市防災工学，地震工学。最近は，リモートセンシングの防災利用について研究。IEEE，SPIE，ASCE，EERI，SSA，土木学会，日本地震工学会，日本リモートセンシング学会などに所属。中央防災会議専門委員，東京都地域危険度測定調査委員会，JAXA 大規模災害衛星画像解析 WG 委員等を歴任。

E-mail : fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp

●松岡 昌志（マツオカ マサシ）



所属：東京工業大学大学院総合理工学研究科 人間環境システム専攻。1990 年室蘭工業大学工学部建築工学科卒業，1992 年東京工業大学大学院総合理工学研究科修士課程修了，同年東京工業大学大学院総合理工学研究科助手，1996 年博士（工学）取得。1996 年リモート・センシング

技術センター，1998 年理化学研究所地震防災フロンティア研究センター（2001 年より防災科学技術研究所に移管）を経て，2007 年産業技術総合研究所，2012 年より現職。専門は地震工学，サイスミックマイクロゾーニング，ジオインフォマティクス。日本建築学会，日本地震工学会，地域安全学会，日本リモートセンシング学会などに所属。

E-mail : matsuoaka.m.ab@m.titech.ac.jp

●野中 崇志（ノナカ タカシ）



所属：株式会社パスコ衛星事業部。1999 年，早稲田大学理工学部卒業。2001 年，東京工業大学大学院総合理工学研究科環境理工学創造専攻修士課程修了，2004 年，同大学大学院同研究科同専攻博士課程修了，博士（工学）。2004 年，株式会社パスコ入社，2008 年より琉球大学非常勤講師

（兼務）。高解像度合成開口レーダデータによる付加価値プロダクトの生成や応用分野の研究開発等に従事。日本リモートセンシング学会，日本写真測量学会，地球惑星科学連合，日本赤外線学会，IEEE の正会員。

E-mail : taakka9299@pasco.co.jp

●笹川 正（ササガワ タダシ）



所属：株式会社パスコ取締役，兼衛星事業部長。1980 年，北海道大学工学部卒業。1982 年，北海道大学大学院工学研究科資源開発専攻修士課程修了，2005 年同研究科より博士（工学）号授与。1982 年，株式会社パスコ入社，これまでデジタルマッピングの標準化，最新鋭の航空機センサー

の導入，デジタルフォトグラメトリーの自動化，衛星事業の創設，衛星データのアプリケーションの開発等に従事。現在は海外事業と衛星事業を担当。日本リモートセンシング学会，日本写真測量学会，地理情報システム学会の正会員。

E-mail : taawda5004@pasco.co.jp