



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

リュウ・ウェン¹⁾、山崎文雄²⁾

- 1) 学生会員 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻・日本学術振興会特別研究員、修(工)
e-mail : wen_liu@graduate.chiba-u.jp
- 2) 正会員 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻、教授 工博
e-mail : fumio.yamazaki@faculty.chiba-u.jp

要約

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、東日本の広域にわたって甚大な被害を引き起こした。またこの地震によって、陸上では最大約5 mの地殻変動が観測された。本研究では、地震前後に撮影された高解像度衛星TerraSAR-Xの強度画像を比較し、無被害の建物の2時期の位置ずれを検出し、これを地殻変動と見なす手法を提案した。最初に、地震前後の強度画像から後方散乱係数の高い建物を抽出し、地震前後の建物を比較することで、変化のない建物の検出を行った。無被害建物の地震前後における位置ずれを面積相関法で求め、それらの平均値をエリア内の地殻変動量と見なした。提案手法を東北地方と東京中心部の衛星画像に適用し、GPS電子基準点の記録との比較で結果の精度を検証した。

キーワード： 合成開口レーダ、強度画像、地殻変動、建物抽出、面積相関法

1. はじめ

2011年3月11日に三陸沖を震源としたMw9.0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6 km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、東北地方を中心とする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¹⁾。このような広範囲で起きた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は数多く存在する。

一方、面的に地殻変動を把握するに有効な手法として衛星画像がよく使用され、主に2種類の手法に分けられる。1つ目は合成開口レーダ(SAR)画像の位相情報を用いた干渉処理である。Massonnet *et al.*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。干渉SARでは、マイクロ波の波長の1/2の変位量が検出できるため、様々な地震や火山活動による地殻変動の観測に用いられてい

る³⁾⁻⁵⁾。しかし、地表植物の季節変化による位相の不干涉⁶⁾や軌道の制限によって、干渉SARを適用しにくい場合もある。2つ目の手法は、画像間の位置ずれを計測することで変動量を求めるPixel offset法である。この手法では、まず2つの画像間の位置ずれ(オフセット)を求め、これから画像全体にわたる位置ずれ成分を取り除き、局所的な変動量を検出する。Michel *et al.*⁷⁾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⁸⁾、RadarsatとEnvisat衛星画像から地殻変動を検出した⁹⁾。Pixel offset法は、SAR画像だけではなく光学画像にも有効である。Crippen¹⁰⁾、Leprince *et al.*¹¹⁾は光学衛星SPOTのパクロマチック画像、松岡・児玉¹²⁾はALOS衛星のPRISM画像を用いた地殻変動検出を行った。また、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て、3次元での地殻変動を検出する研究も行われている¹³⁾⁻¹⁵⁾。

しかし、2011年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広く、1組の干渉SAR結果からは相対的な変動しか求められない。また、東北地方の沿岸部では津波によって地表が大きく変化し、通常のPixel offset法では計測できない地域もある。そこで本研究では、地震前後の高解像度TerraSAR-X (TSX)画像から、無被害の建物の位置ずれに注目して地殻変動を検出する手法を提案する。この手法を地震前後の宮城県沿岸と岩手県内陸を撮影したTSX画像に適用し、変動量の検出を行うとともに、国土地理院のGPS電子基準点の観測データと比較することで、その精度を検証する。

2. 画像データと前処理

本研究の対象地域は、最も被害が甚大な宮城県と岩手県である。図1(a)に示す仙台市を含む宮城県沿岸部と岩手県内陸部を撮影した地震前後のTSX画像を用いた。宮城県の画像は、図1(b-c)に示す地震前の2010年10月26日と地震後の2011年3月18日(地震後7日目)に撮影されたものである。岩手県の画像は、図1(d-e)に示す地震前の2010年5月31日と地震後の2011年5月29日に撮影されたものである。画像の撮影条件を表1に示す。4枚の画像ともに、下降軌道からStripMapモードによりHH偏波で観測された。画像は幾何補正と地形補正(EEC)後に、1.25 m/pixelの解像度にリサンプリングされたものを使用した。

地殻変動の検出を行う前に、放射輝度補正とノイズの除去を行う必要がある。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。補正後の宮城県の画像における後方散乱係数は-55 dBから30 dBの範囲であり、岩手県の画像は-40 dBから20 dBの範囲であった。宮城県の画像は後方散乱係数の高い都市域と低い浸水地域を含むため、岩手県の画像により後方散乱係数の範囲が広い。また、SAR画像には多くのスペ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¹⁶⁾を用いた。この際、詳細な地表面の情報を保留するために、最も小さい3×3ピクセルのウィンドウ幅を使用した。

従来のPixel offset法では、画像間の全体的な位置合わせも必要である。しかし、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く、用いた画像の端部においても3 mほどの地殻変動が発生している。このように一方向への変位が優勢な場合には、Pixel offset法は画像端部に対する相対的な変位すら求められない。そのため、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、主に軌道と数値標高モデル(DEM)で決められている¹⁷⁾。4枚のTSX画像は同一DEM(SRTM-90)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¹⁸⁾。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。4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20 cm以内である。

宮城県のTSX画像の撮影範囲内には「宮城大和」、「利府」、「仙台」、「名取」、「亘理」の5ヶ所のGPS電子基準点が存在する。また沿岸部においては、津波の遡上による浸水や瓦礫堆積によって、地表面の性状が激しく変化した範囲が広がっている。「名取」電子基準点周辺における地震前後画像のカラー合成図(R:地震後;G+B:地震前)を図2(a)に示す。青色は湛水している地域を表している。岩手県の画像撮影範囲内には「川井」、「遠野」、「住田」の3ヶ所のGPS電子基準点がある。

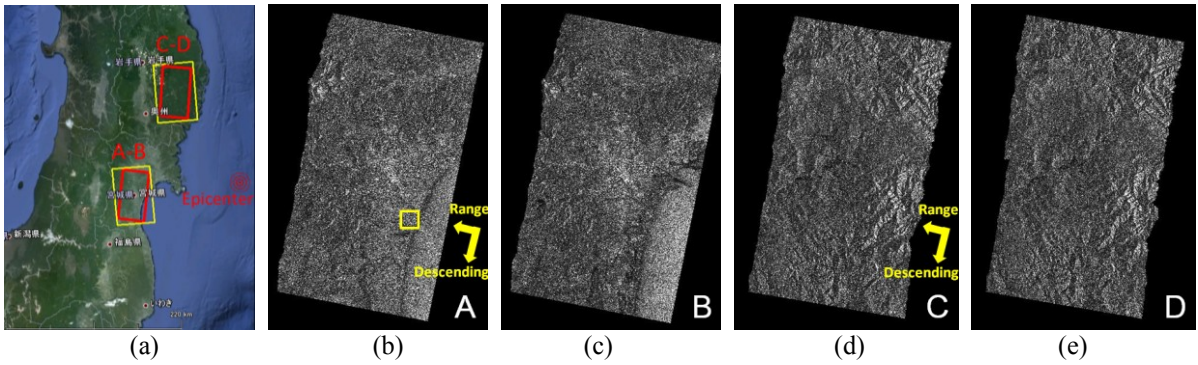


図1 Google Earthに表示した対象範囲の宮城県沿岸部と岩手県内陸部(a)、地震前の2010年10月26日(b)と地震後の2011年3月18日(c)に撮影された宮城県のTSX画像、地震前の2010年5月31日(d)と地震後の2011年5月29日(e)に撮影された岩手県のTSX画像

表1 使用したTSX画像の撮影条件

撮影地域	宮城県		岩手県	
図番号	A	B	C	D
撮影日	2010.10.26	2011.03.18	2010.05.31	2011.05.29
観測角度	21.474°	21.344°	35.277°	35.320°
パス角度	191.322°	191.331°	190.217°	190.215°
解像度(R×A)	3.52 m × 3.05 m		3.20 m × 3.04 m	
撮影モード	StripMap			
補正	EEC			

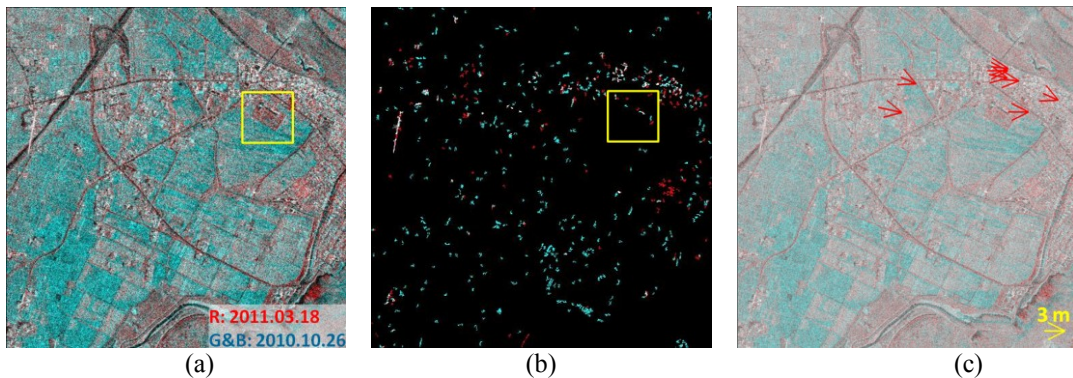


図2 図1(b)に示す枠内の範囲(5 km×5 km)における地震前後画像(a)とセグメンテーションで求められた建物オブジェクト(b)を用いたカラー合成図；検出された建物の変動ベクトル(c)

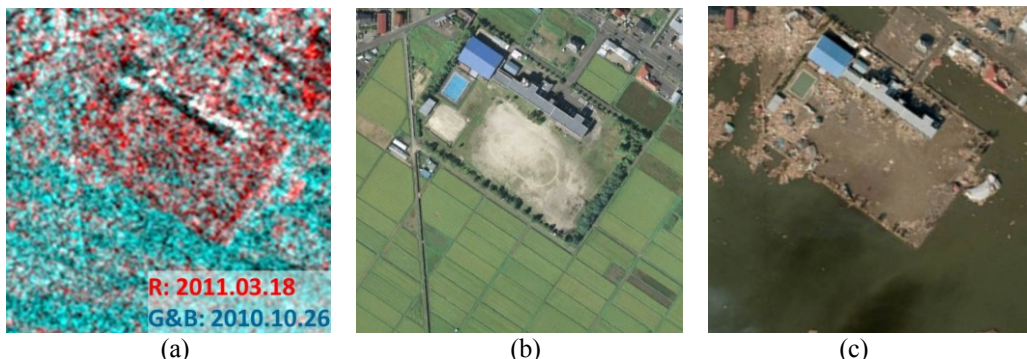


図3 図2(a)に示す黄色枠内の範囲の拡大(a)、その範囲を撮影した2009年3月21日の地震前の航空写真(b)と2011年3月12日に国土地理院が撮影した地震後の航空写真(c)

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、建物だけでなく画像の小領域で行う研究が多い⁷⁾¹²⁾。しかし、今回は図3に示すように、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。地震前後の同じ範囲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う。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の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。

3.1 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強度画像の後方散乱係数のヒストグラムを用いて、建物と区別するための閾値を目視により -2.0 dBに決定した。また、小さい木造建物が津波で流された可能性が高いことから、一定大きさ以上の建物のみを対象とする。そのため、面積が100ピクセル(約 150 m^2)以上のオブジェクトを建物として抽出した。図2(a)に示す画像から抽出された地震前後の建物オブジェクトを、カラー合成して図2(b)に示す。図3に示す範囲の建物オブジェクトを示した図4(a)から、建物の輪郭がシアン(B+G)から赤へ、約1ピクセルのズレが確認できる。本研究では、このズレ量を地殻変動によって生じたと見なすことにする。

3.2 無被害建物の検出

対象とする地域では、遡上した津波によって多くの木造建物が破壊された。地殻変動を抽出するには、被害を受けていない建物の位置の変化が必要である。そのため、抽出されたすべての建物オブジェクトから、無被害建物の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対象建物エリアとして抽出する。そして、対象建物エリアの中心から、一回り大きい検索範囲を設定する。対象建物エリアと検索範囲の一例を図4(b)に示す。もし、地震後の画像における検出範囲内に建物が存在する場合、この対象となる建物オブジェクトを無被害建物と判断する。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 5.3 m であるため、検索範囲は対象建物エリアから5ピクセル(6.25 m)以内と設定することにした。

3.3 無被害建物の位置ズレに基づく地殻変動量の推定

地震前後の画像における無被害建物の位置ズレ(移動量)を地殻変動量と見なし、面積相関法により求める。マッチングの精度を向上するために、抽出された無被害建物オブジェクトだけでなく、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、テンプレー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。その一例を図4(c)に示す。T画像をI画像の上に移動しながら、面積相関法の式(1)によって -1 から 1 までの相関係数(r)を計算し、マトリックスに記録する。

$$r(a,b) = \frac{\sum_{i=0}^{M_T-1} \sum_{j=0}^{N_T-1} \{I_{(a,b)}(i,j) - \bar{I}\} \{T(i,j) - \bar{T}\}}{\sqrt{\sum_{i=0}^{M_T-1} \sum_{j=0}^{N_T-1} \{I_{(a,b)}(i,j) - \bar{I}\}^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{M_T-1} \sum_{j=0}^{N_T-1} \{T(i,j) - \bar{T}\}^2}} \quad (1)$$

ただし、

$$\begin{cases} \bar{I} = \frac{1}{M_T N_T} \sum_{i=0}^{M_T-1} \sum_{j=0}^{N_T-1} I_{(a,b)}(i,j) \\ \bar{T} = \frac{1}{M_T N_T} \sum_{i=0}^{M_T-1} \sum_{j=0}^{N_T-1} T(i,j) \end{cases}$$

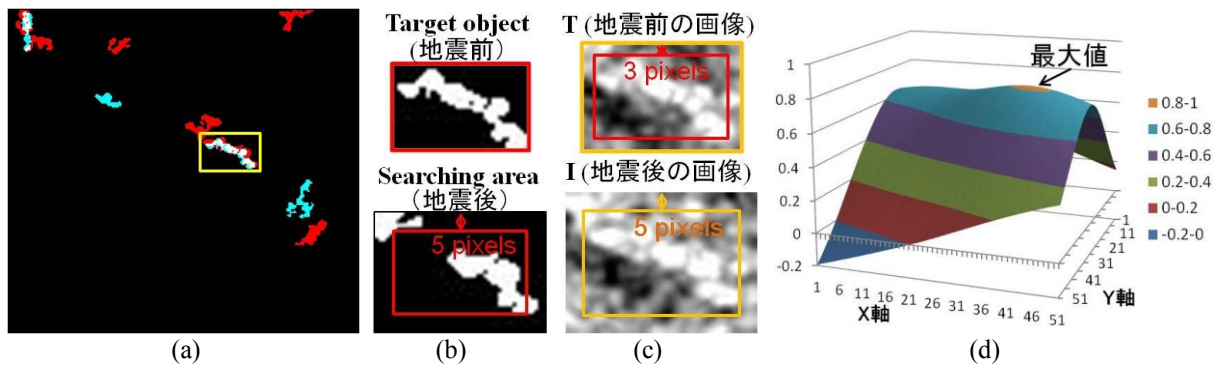


図4 図3に示すエリアにおける建物オブジェクトのカラー合成図(a)；地震前の対象建物オブジェクトと地震後の検索エリア(b)、地震前の強度画像から切り出したテンプレート画像(T)と地震後の画像からの検索画像(I)(c)、および求められた相関マトリックス(d)

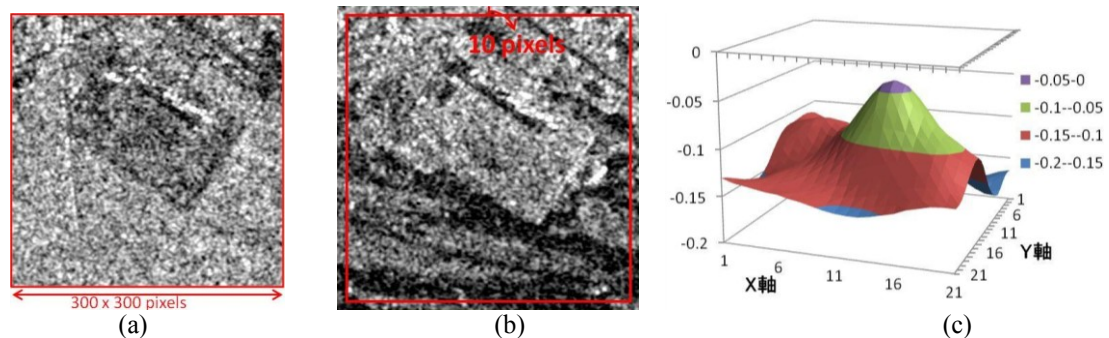


図5 図3に示すエリアにおける地震前のターゲット画像(a)とその周辺10ピクセル以内の地震後の検索画像(b)、および求められた相関マトリックス(c)

ここで、 $M \times N$ は画像の画素数であり、 (a, b) は検索画像内におけるテンプレート画像の位置を示し、 $I_{(a, b)}(i, j)$ は検索画像の部分画像である。

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、マトリックスの中心点が最も高い相関を示す。建物が移動した場合、マトリッ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法で0.25 m/pixelに再サンプリングした。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ックスの例を図4(d)に示す。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0.8以上の建物についてのみ移動量を有効とした。この例とした建物は、東方向へ3.00 m移動したと検出された。

図2(a)に示す「名取」電子基準点周辺の画像を用いて、検出された建物の変動ベクトルを図2(c)に示す。この付近は主に水田であり、地震前の画像からは391棟の建物が抽出され、そのうち120棟が変化なしと検出された。しかし、津波被害によって、相関係数が0.8以上の建物は、電子基準点が設置された名取市閑上中学校の校舎を含めてわずか8棟であった。移動量の平均は東へ2.75 mと南へ0.47 mであった。

3.4 従来のPixel offset法との比較

本研究で提案した検出手法を従来の広範囲で行うPixel offset法と比較するため、図5(a-b)に示す小領域を用いたマッチングも行った。地震前の強度画像から300×300ピクセルのテンプレート画像と、地震後の強度画像からその周辺10ピクセル内の領域(320×320ピクセル)を検索画像として抽出した。式(1)で求められた相関マトリックスを図5(c)に示す。中心点から東へ2ピクセル(2.5 m)、南へ1ピクセル(1.25 m)のところ相関が最も高く、相関係数は-0.04であった。津波の浸水によって地表面が激しく変化し、すべての位置において相関係数が負の値であり、信頼できるものとはいえない。この結果から、今回の地震においては、本研究が提案した多数の無被害建物による移動の平均を取る方法が、従来の広範囲で行うPixel offset法より有効であると判断できる。

4. 地殻変動の検出結果

宮城県と岩手県を撮影した地震前後のTSX画像を4000×4000ピクセル(25 km²)のメッシュに分割し、各メッシュ内における建物の移動量を計算し、その平均値を地殻変動量として検出した。地殻変動量の信頼性を保持するために、10棟以上の建物変動量が検出されたメッシュのみ有効とした。

4.1 宮城県

宮城県を撮影した画像から、図6(a)に示す赤枠内のエリアを対象とした。データなしと海のメッシュを除き、全69メッシュに対して建物の抽出と移動量の検出を行い、そのうち46メッシュの地殻変動量が検出できた。そのベクトル結果を図6(b)に示す。西北側の山間部に町がないため、建物が抽出されず、変動量の検出ができなかった。また、沿岸部では「名取」電子基準点の周辺と同様に、津波の被害によって相関が高い建物が少なく、有効ではないエリアが存在する。

検出された変動量の大きさを色付けした結果を図6(c)に示す。検出された変動量は、2 mから3 mの範囲内にあった。地震の震源地に近い北東側で検出された変動量が最も大きく、内陸に行くほど小さくなる。また、南に行くほど変動量が小さくなる傾向が見えられる。図6(b)に示す変動ベクトルの方向を比較すると、北東側では東南東へ変動したが、南に行くほど変動の方向が東に近づく。これらの傾向は、国土地理院が公開したGPS電子基準点で観測した結果と一致する。「名取」を除く4つのGPS電子基準点周辺のメッシュで検出された変動量と方向を表2に示す。

4.2 岩手県

TSX画像が撮影した岩手県の範囲は主に中山間地であり、建物が少ないため、本研究は図7(a)に示すGPS電子基準点が設置されたメッシュのみを対象とした。「川井」基準点が置かれたのは川井村(現宮古市)であり、地形の起伏が激しい地域である。そのため、高い後方散乱係数で抽出されたオブジェクトは建物だけでなく、山の稜線もたくさん抽出された。地震前後画像の相関係数から、9棟の建物における変動量が検出された。このエリアでは斜面に立つ建物もあるため、検出された変動量の方向は地形の影響を受けて、バラつきが大きかった。その結果を図7(b)に示す。変動量の平均値は東へ2.00 m、南へ1.47 mであり、方位は北から時計回りに128.8°であった。

「遠野」基準点の周辺は山間の盆地であり、地形の起伏は比較的少ない。1368個の建物オブジェクトが地震前の画像から抽出され、そのうち381棟の建物の変動量が検出された。その結果を図7(b)に示す。変動量の平均値は東へ2.16 m、南へ1.57 mであり、方向は北から時計回りに126.2°であった。検出された変動ベクトルの方位は多少のバラつきがあったものの、方位角の標準偏差が8.1°であることから、ほぼ同じ方位に向いていることがわかる。「住田」基準点周辺では、「川井」と同様に起伏が激しいため、建物と山の稜線を含めて3037個の建物オブジェクトが地震前の画像から抽出された。そのうち56棟の建物の変動量が検出された。変動量の平均値は東へ3.04 m、南へ1.90 mであり、方向は北から時計回りに122.8°であった。東西方向と南北方向における変動量の標準偏差はともに1 m以下で、方位角の標準偏差は7.6°であった。

TSX画像が撮影した岩手県の対象エリアは、東北地方太平洋沖地震の震源域の北西側であり、震源域の南西側を撮影した宮城県の画像から検出された地殻変動とやや違う傾向が見られた。3つの電子基準点周辺の変動量を比較すると、南に行くほど変動量が大きくなった。しかし、その向きは宮城県と同じく、南に行くほど東へ近づく。これらの傾向もGPS電子基準点で観測されたデータと一致している。

5. 検証と精度評価

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の2時期TSX画像と、国土地理院が日本全国に設置したGPS電子基準点の記録を用いた。

5.1 常時の2時期画像

図8(a-b)に示す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日のものであり、

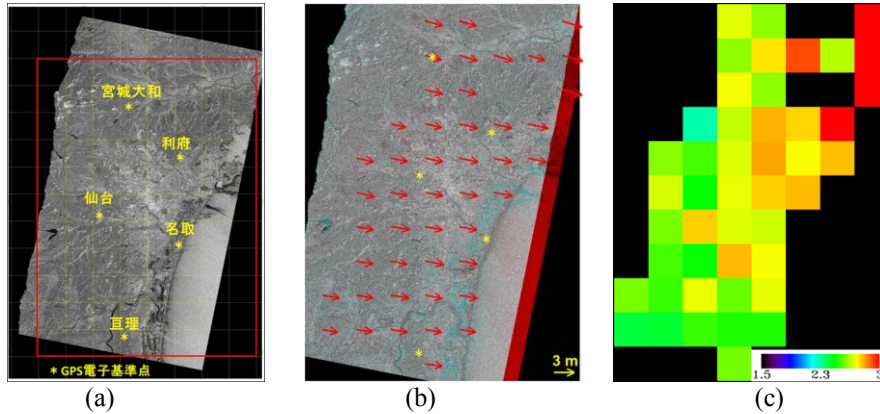


図6 宮城県の画像における対象エリア(a)、検出されたメッシュごとの変動ベクトル(b)と変動量図(c)

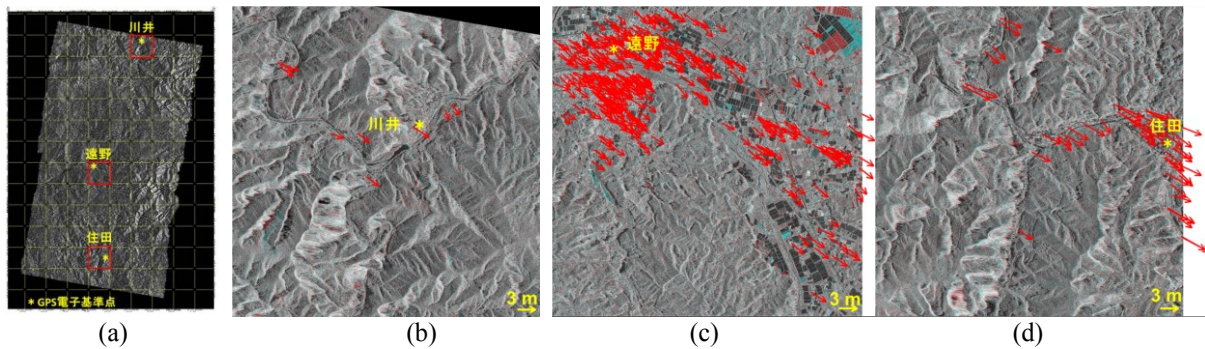


図7 岩手県の画像における対象エリア(a)、「川井」(b)、「遠野」(c)と「住田」(d)、3つの基準点周辺で検出された変動ベクトル

表2 TSX画像から検出された地殻変動とGPS観測データの比較

地点	宮城県の変動量 (m)					岩手県の変動量 (m)			
	宮城大和	利府	仙台	名取	亶理	川井	遠野	住田	
手法	棟数 東 南	棟数 東 南	棟数 東 南	棟数 東 南	棟数 東 南	棟数 東 南	棟数 東 南	棟数 東 南	
TSX	19 2.39 0.68	51 2.66 0.64	15 2.55 0.62	8 2.75 0.47	46 2.52 0.33	9 2.00 1.47	381 2.16 1.57	56 3.04 1.90	
GPS	2.43 0.69	2.52 0.68	2.32 0.52	- -	2.33 0.40	1.72 1.37	2.33 1.54	2.82 1.72	

撮影範囲は $5 \times 5 \text{ km}^2$ である。観測角度はともに 41.8° で、撮影条件は東北地方のTSX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。そのうち相関係数が0.8以上の1433棟に対し移動量の検出を行った。検出された変動ベクトルと変動量のヒストグラムを図8(c-d)に示す。変動ベクトルの絶対値の平均は 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。平均変動ベクトル長がやや大きい理由としては、約 3m の画像解像度が原因となった小さい誤差が検出されたことによる。しかし、これらの誤差変動はランダムな方向に分布し、平均を取ると0に近くなることが分かった。この結果より、本研究で提案した手法は、サブピクセルの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。今回は 1.25m の画像ピクセルを 0.25m に再サンプリングして用いたが、概ね 0.3m 程度の位置精度を有することが示された。

5.2 GPS電子基準点との比較

宮城県と岩手県を撮影したTSX画像で検出された地殻変動量について、GPS電子基準点の記録を用いて比較を行った。地殻変動は3次元空間で東西方向ベクトル D_E 、南北方向ベクトル D_N と垂直方向ベクトル

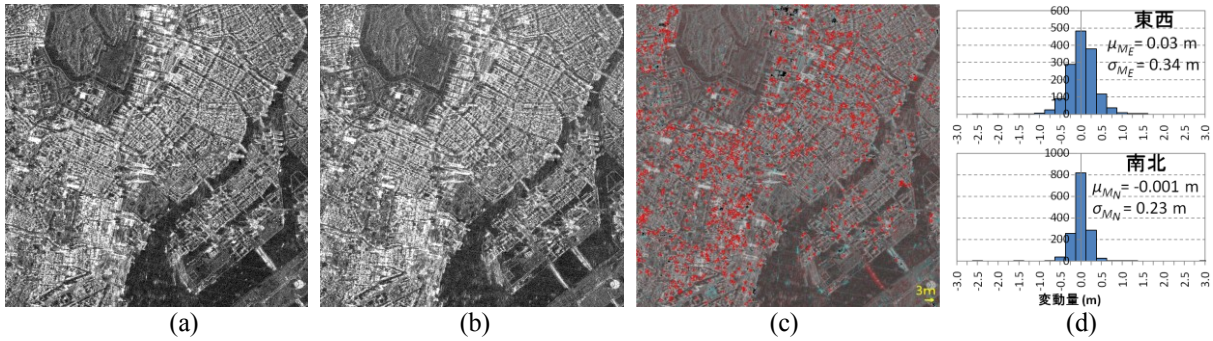


図8 2008年5月24日(a)と2009年11月24日(b)に撮影された東京都中心部のTSX画像から検出された変動ベクトル(c)と変動量のヒストグラム(d)

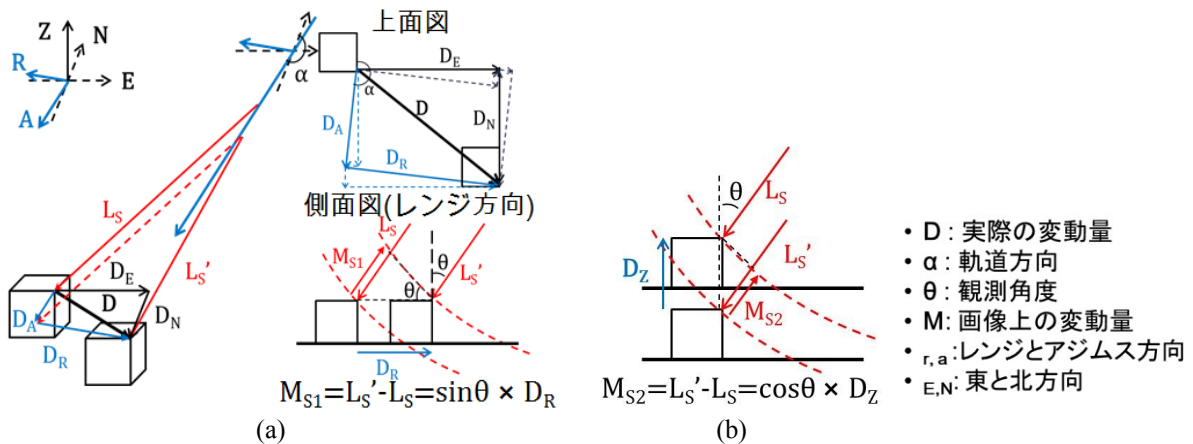


図9 斜め観測するSAR画像上の2次元変動と実際の水平変動(a)と垂直変動(b)の関係

ル D_Z に分けられる。この変動ベクトルと、斜め観測を行うSAR画像の関係を図9に示す。 L_S と L_S' は、変動前後のスラントレンジであり、 M_{S1} と M_{S2} は水平変動と垂直変動によるスラントレンジでの変位である。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 と3次元地殻変動ベクトルの関係は、式(2)で表される。

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

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。

宮城県の画像範囲内にある「名取」を除く4つの基準点は、地震前後の画像の撮影期間中に約0.2mの沈下が観測された。「名取」基準点は津波の影響を受け、地震直後の3月13日から4月17日まで停止したため、地殻変動量の観測ができなかった。こういった非常事態においては、本研究で提案した手法は地上観測より優れていると考えられる。岩手県のTSX画像範囲内にある3つの電子基準点では、画像の撮影期間中に約0.3mの沈下が観測された。これらの垂直変動を式(2)によって画像における東西と南北方向に変換した観測データを表2に示す。また、2011年3月1日から4月25日までのGPS観測データとTSX画像から求めた変動量を図10に比較する。

表2と図10に示すように、本研究の手法による地殻変動量とGPS基準点の観測記録は、大変よく近似した結果になった。7時点のGPS観測記録とTSX画像から検出された変動量の平均誤差は、東西方向に0.12m、南北方向に0.04mであった。東西方向の最大誤差は0.3m以下で、南北方向ではわずか0.1mであった。本研究では2時期画像の位置合わせは衛星の軌道情報のみに依存しており、この非常に小さい誤差は、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の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。

— GPS電子基準点の観測データ □ TSX画像から検出された結果

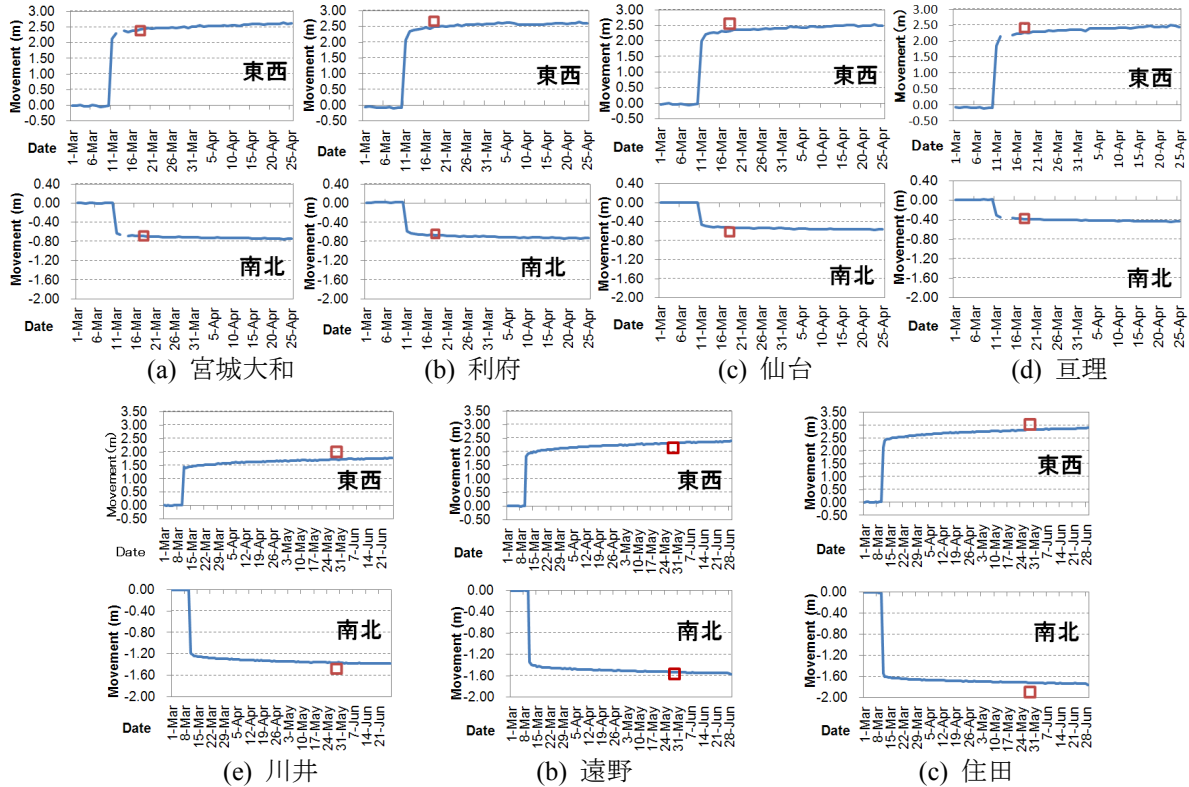


図 10 2011年3月1日から4月25日の期間で7地点のGPS基準点の観測記録の換算変位とTSX画像から検出された本震から3月18日までの地殻変動量の比較

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、2011年東北地方太平洋沖地震の前後に宮城県と岩手県を撮影した画像と、常時の東京都心部の画像に適用した。TSX画像の位置情報を直接に利用することで、地殻変動の絶対変位が得られた。また、無被害の建物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高い相関が得られ、変動量の検出が可能となった。しかし、建物が存在しない地域では提案した手法の適用が難しく、宮城県と岩手県における一部の地域では地殻変動量を検出できなかった。また、「名取」や「川井」電子基準点の周辺のように無建物が少ない地域では、検出された変動量の棟数が閾値として設定した10棟に足りず、変動が検出されても精度が不十分な恐れがあると判断された。

本研究で提案した手法の精度は、画像の位置精度に依存するものである。しかし、東北地方のTSX画像から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(0.25m)単位で変動を検出することができた。また、変化を含まないはずの東京における2時期の画像からも、東北地方の画像と同レベルの誤差が認められたため、本研究に用いたScience軌道補正のStripMap画像における位置精度は、東西方向に0.3 m、南北方向に0.1 m程度になる。誤差の主な原因は3 m解像度によるミクセル化と画像本来の位置精度と考えられる。そのため、1 m解像度のSpotLightモードの画像を用いれば、より良い精度での検出が期待できる。今後は、提案した手法を多様な画像に適用し、適用範囲の検討と手法の改善を行う。さらに、上昇軌道のTSX画像と組み合わせることで、鉛直変位も含めた3次元の地殻変動量を推測する手法へ発展させる予定である。

謝 辞

本研究で用いた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。また、TerraSAR-X画像の位置精度に関する情報を頂いたDLRのMartin Huber博士とHannes Taubenböck博士に謝意を表す。

参考文献

- 1) 国土地理院 : http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h23_tohoku.html#namelink3.
- 2) Massonnet, D., Rossi, M., Carmona, C., Adragna, F., Peltzer, G., Feigl, K., and Rabaute T.: The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, Vol. 364, 1993, pp.138-142.
- 3) Amelung, F., Jonsson, S., Zebker H., and Segall P.: Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galapagos volcanoes observed with radar interferometry, *Nature*, Vol. 407, 2000, pp.993-996.
- 4) Stramondo, S., Cinti, F. R., Dragoni, M., Salvi, S., and Santini, S.: 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, 2002, pp. 527-536.
- 5) Chini, M., Atzori, S., Trasatti, E., Bignami, C., Kyriakopoulos, C., Tolomei, C., and Stramondo, S.: The May 12, 2008, (Mw 7.9) Sichuan Earthquake (China): Multiframe ALOS-PALSAR DInSAR Analysis of Coseismic Deformation”, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 7, No. 2, 2010, pp. 266-270.
- 6) Bürgmann, R., Rosen, P.A., and Fielding, E.J.: Synthetic Aperture Radar interferometry to measure earth's surface topography and its deformation, *Annual Reviews Earth and Planet Sciences*, Vol. 28, 2000, pp.169-209.
- 7) Michel, R., Avouac, J.-P., and Taboury, J.: Measuring ground displacements from SAR amplitude image: application to the Landers earthquake, *IEEE Geophysical Research Letters*, Vol. 26, No. 27, 1999, pp. 875-878.
- 8) 飛田幹男, 藤原智, 村上亮, 中川弘之, Rosen, P. A.: 干渉SARのための高精度画像マッチング, 日本測地学会誌, Vol. 45, 1999, pp. 297-314.
- 9) Tobita, M., Suito, H., Imakiire, T., Kato, M., Fujiwara, S., and Murakami, M.: Outline of vertical displacement of the 2004 and 2005 Sumatra earthquakes revealed by satellite radar imagery, *Earth Planets Space*, Vol. 48, No. 1, 2006, pp. e1-e4.
- 10) Crippen, R.E.: Measurement of sub resolution terrain displacements using SPOT panchromatic imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, No. 1, 1992, pp. 56-61.
- 11) Leprince, S., Barbot, S., Ayoub, F., and Avouac, J.-P.: Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, Application to ground deformation measurements, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45, No. 6, 2007, pp. 1529-1558.
- 12) Matsuoka, M., Kodama, S.: Coseismic displacement measurement of the 2010 El Mayor, Mexico earthquake by subpixel correlation from optical satellite images, *IGARSS*, 2011, pp.4010-4013.
- 13) Tobita, M., Murakami, M., Nakagawa, H., Yaraï, H., Fujiwara, S., and Rosen P.A.: 3-D surface deformation of the 2000 Usu eruption measured by matching of SAR images, *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, No. 22, 2001, 4291-4294.
- 14) Fialko, Y., Simons, M., and Agnew, D.: The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations, *Geophysical Research Letters*, Vol. 28, No. 16, 2001, pp. 3063-3066.
- 15) Catalão, J., Nico, G., Hanssen, R., and Catita, C.: Merging GPS and atmospherically corrected InSAR data to map 3-D terrain displacement velocity, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 49, No. 6, 2011, pp. 2354-2360.
- 16) Lopes, A., Touzi, R., and Nezry, E.: Adaptive speckle filters and Scene heterogeneity, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28, No. 6, 1990, pp. 992-1000.
- 17) Eineder, M., Fritz, T., Mittermayer, J., Roth, A., Borner, E. Breit, H., and Brautigam, B.: TerraSAR-X Ground Segment Basic Product Specification Document, Issue 1.7, 2010, pp. 31-32.
- 18) Breit, H., Fritz, T., Balss, U., Lachaise, M., Niedermeier, A., and Vonavka, M.: TerraSAR-X SAR processing and products, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 48, No. 2, 2010, pp. 727-739.

(受理：2012年 3月 28日)
(掲載決定：2012年 6月 13日)

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

LIU Wen ¹⁾, YAMAZAKI Fumio ²⁾

1) Student member, PhD. Student, Graduate School of Engineering, Chiba University; JSPS research fellow.

2) Member, Professor, Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

ABSTRACT

The 11 March 2011 Tohoku, Japan Earthquake caused widespread devastation in the eastern Japan. Crustal movements larger than 5 m were observed on the land after the earthquake. In this study, a method to grasp the surface movement from pre- and post-event TerraSAR-X intensity images was 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 of Tohoku region and central Tokyo, and the accuracy was verified by the observed data from GPS ground stations.

Key Words: SAR, Intensity image, Crustal movement, Building extraction, Area-based matching