

Xバンド干渉 SAR のコヒーレンス 画像を用いた 2009 年スマトラ島沖 地震による崩壊形状の検出

河邑 眞*・辻野 和彦**・辻子 裕二**・岡島 裕樹***・
ジャフリル タンジュン****

Detection of Slope Failures due to the 2009 Sumatra Earthquake by Using Coherence Image of X-band Interferometric SAR

Makoto KAWAMURA*, Kazuhiko TSUJINO**, Yuji TSUJIKO**,
Yuki OKAJIMA*** and Jafril TANJUNG****

Abstract

In this research, we proposed a slope failure detector using high resolution X-band SAR satellite images. For the detector the values of the coherence calculated by the phase of the X-band micro wave images for interferometric SAR were selected. The proposed method was applied to the detection of large number of earthquake induced slope failures in the Padang Pariaman Prefecture triggered by the 2009 Sumatra earthquake in West Sumatra, Indonesia. As a result, when the threshold value of coherence image is 0.4, the rates of correct detection, wrong detection and overlook are 73.5%, 7.7% and 26.5%, respectively.

キーワード：2009年スマトラ島沖地震，斜面崩壊，タンDEM-X，干渉 SAR，コヒーレンス

Key words：the 2009 Sumatra Earthquake, Slope failure, TanDEM-X, Interferometric SAR, and Coherence

* 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系
Department of Architecture and Civil Engineering,
Toyohashi University of Technology

** 福井工業高等専門学校 環境都市工学科
Department of Civil Engineering, Fukui National College
of Technology

*** 株式会社バスコ 衛星事業部
Satellite Business Division, PASCO CORPORATION

**** アンダラス大学 土木工学科
Department of Civil Engineering, Andalas University,
Indonesia

本論文に対する討論は平成25年5月末日まで受け付ける。

1. はじめに

近年、国内外を問わず大規模地震や集中豪雨が頻発しているが、これらを誘因として山間部の斜面では崩壊や土石流等の災害が数多く発生する。このような状況下で、我が国では航空機やヘリコプターが使用され被災箇所の概略の把握が行われるが、開発途上国ではそのような手段の選択が困難で広域での被災箇所の把握に時間を要する。一方、マイクロ波を利用した合成開口レーダ (SAR: Synthetic Aperture Radar) 画像は、天候の影響を受けにくく災害発生時の緊急観測や初期の災害状況把握への貢献が期待でき、とくに降雨の多い熱帯地方での適用が期待される。

翠川らは、2008年岩手・宮城内陸地震を誘因として発生した荒砥沢ダム上流域の斜面災害を対象として、TerraSAR-X (以下、TSX) の高分解能 SpotLight 画像 (SL, 空間分解能: 約 1 m) のテクスチャ解析により約75%の精度で斜面災害地域を抽出している¹⁾。また、鶴殿らは TSX のスタック画像を用いて2011年9月の台風12号を誘因として発生した五條市の洪水・土砂災害箇所を判読している²⁾。スタック画像とは二時期の画像データの一つにまとめたものであり、彼らは赤のチャンネルに災害前、緑と青のチャンネルに災害後の画像を当てはめている。この組合せの場合、概略の崩壊箇所は水色で判読できる。しかし、詳細な崩壊形状は明瞭とは言えない。

筆者らは、2009年スマトラ島沖地震を誘因として発生した斜面崩壊を事例として、地震前後における二時期の TSX の StripMap 画像 (SM, 空間分解能: 約 3 m)、および地震直後における TSX の SM 画像を用いて斜面崩壊の検出法を検討した。その結果、地震直後の TSX 画像と局所入射角を用いて約65%の精度で崩壊発生域 (滑落崖) の検出が可能であることを示した^{3,4)}。これは、地震直後のデータセットのみを用いて被災箇所の概略を把握することが可能であること意味する。しかし、SAR の性能を最大限に発揮するには、強度画像のみを用いて崩壊箇所の把握を行うだけでなく位相差を用いた干渉 SAR (InSAR: Interferometric SAR) 処理による精度向上が期待される。

なお、InSAR 処理は確立された手法であり、標高や地殻変動等を推定した事例は多数報告されている⁵⁻⁸⁾。LバンドやCバンドのInSAR処理は広く用いられているが、Xバンドを用いたInSAR処理は岩盤が露出している場合に限定されることが多い⁹⁻¹¹⁾。また、前述のように斜面崩壊は地すべりと異なり露出した地表面がかなり攪乱されているため、強度画像のみでその場所を特定するのは難しい。そこで本研究では、XバンドのInSAR処理において計算されるコヒーレンスに着目し、崩壊箇所の面的な把握に関する精度向上を目的として、このコヒーレンスを斜面崩壊箇所検出のための指標として設定した。

インドネシアは熱帯雨林気候であり、雨季 (11月~4月) においては、毎日、1時間程度の激しいスコールがある。地震により植生が無くなった崩壊箇所に強い雨が降り注ぐことにより、斜面崩壊の面的な拡大や鉛直方向の侵食が発生していると考えた。本研究では2009年スマトラ島沖地震で大規模な斜面災害が多発したパダンパリアマン県の G. Tigo (グヌーン・ティゴ) 地区を対象として InSAR 処理で得られるコヒーレンスを利用して崩壊形状の面的な把握を試みた。また、この結果と現地調査の結果を比較し、検出精度の評価を行った。

2. 2009年スマトラ島沖地震の概要と使用データ

2.1 地震の概要

2009年スマトラ島沖地震は9月30日17時16分 (インドネシア西部時間) に発生した。震源地は、パダン西北西沖のインド洋 (0.84°S, 99.65°E) で震源の深さは71 km、地震の規模は Mw7.6 であった。インドネシア国家防災庁の2009年10月9日時点の発表によると、この地震による死者は784名、行方不明者は242名に上った。地震直後には、各学協会が主体となって現地調査が実施された¹²⁾。本研究の解析対象域 (G. Tigo 地区) は、2009年スマトラ島沖地震によって最も被害を受けた地域の一つであり、3つの集落が脆弱な石灰岩質の崩壊土砂に埋もれ、村民約300人が生き埋めとなった場所である。

2.2 使用データ

本研究で使用したデータの一覧を表1に示す。本研究で使用したSARデータは、ドイツ航空宇宙センター(DLR)より提供されるTanDEM-X(以下、TDX: TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement)の複素データ(SSC: Single Look Slant Range Complex)である。TDXは、2010年6月21日に打ち上げられた。そのミッションは、既に打ち上げられているTSXと250mから500m程度の距離で軌道を周回しながら全球的なDEMの整備を行うこととされる¹³⁾。本研究では、InSAR処理を実施するため、2011年3月14日および3月25日に撮影されたTDX画像のペアをリクエストした。図1には地震直後に撮影されたTSXのSM画像と2011年3月14日に撮影されたTDXの高分解能SpotLight画像(HS 300MHz)を示す。なお、図郭の四隅には、UTM座標系(Zone 47 S, WGS-84楕円体)の座標値を示した。

また、TSXやTDXの特徴として、Xバンド(波長:約3cm)を利用していることが挙げられる。Xバンドのような短波長のマイクロ波は、樹冠の葉を透過せず、樹冠表面からの後方散乱が主となる。一方で、斜面崩壊箇所は、地表面(土)からの後方散乱が主となる。したがって、Xバンドを利用することで、植生がある場所と無い場所(すなわち崩壊箇所)でコヒーレンスに差異が生じるはずである。

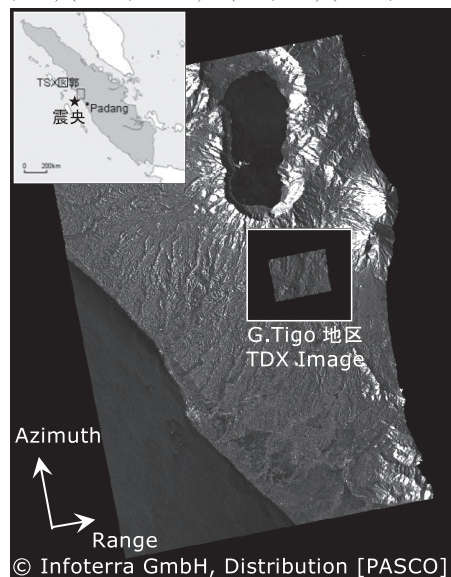
その他、光学センサーデータとしてSPOT-5画像を利用した。この画像は、地震直後の崩壊形状をトレースするために用いた。なお、崩壊形状には、崩壊の発生域、崩土の降下区域、崩壊土砂の堆積域を含めた。また、全球的に整備されている数値標高データ(SRTM-3)は、InSAR処理やオルソ補正に利用した。

また、TDXの撮影に近い時期に合わせて2011年5月31日および6月1日に空撮ヘリコプター(Falcon-PARS¹⁴⁾)によるオルソ画像(空間分解能:約5.5cm/pixel)を撮影した。研究対象域は熱帯雨林気候のため、植生の生長が著しい。したがって、前述のSPOT-5画像を用いて地震直後の崩壊形状をトレースした結果は、そのまま利用するこ

表1 使用データ

データ	備考	
衛星画像	TDX [HS 300 MHz] 2011年3月14日, Ascending, HH, 空間分解能:約1 m, 入射角:46.14°	ベースライン: 169.60m
	2011年3月25日, Ascending, HH, 空間分解能:約1 m, 入射角:46.14°	
	SPOT-5 2009年10月8日, オルソ画像 空間分解能:約10m, 地震直後の崩壊形状のトレースに利用	
標高	SRTM-3 約90mメッシュ	
空撮画像	Falcon-PARS 小型空撮ヘリコプター (Falcon-PARS)より2011年5月31日および6月1日に撮影, 空間分解能:約5.5cm/pixel	

(ULX, ULY)=(602999, 9979500) (URX, URY)=(655999, 9979500)



(LLX, LLY)=(602999, 9910500) (LRX, LRY)=(655999, 9910500)

図1 研究対象域(G. Tigo地区)のTDX画像(2011年3月14日撮影)

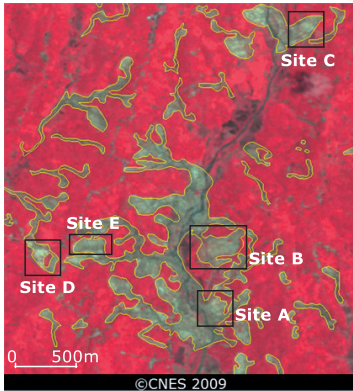
とはできない。そこで、本研究ではこの空撮オルソ画像を検出精度の評価に用いた。

3. G. Tigo地区の現地調査

3.1 現地調査の概要

現地調査はこれまでに2度実施している。なお、図2は、現地調査を重点的に行ったサイトの

(ULX, ULY)=(636324, 9948342) (URX, URY)=(639144, 9948342)



(LLX, LLY)=(636324, 9945238) (LRX, LRY)=(639144, 9945238)

図2 重点的に現地調査を行ったサイトと地震直後の崩壊形状のトレース結果
(背景：SPOT-5フォールスカラー画像)

位置を示している。図1と同様に、図郭の四隅にはUTM座標系の座標値を示した。第1回の現地調査は、2010年1月18日から20日にかけてアクセスできる範囲(Site AからSite E)で実施した¹⁵⁾。また、第2回(Site A, B, C)は、2011年3月13日から15日にかけて崩壊形状を現地で重点的に把握するために行った。なお、第2回の現地調査は、TDXの観測日の間に行った。なお、Site DおよびEについては、第2回の現地調査を行うことができなかったため、説明は省略する。

現地調査では崩壊形状を把握するために、GPS測量、距離測量、斜面傾斜角の測定、写真撮影等を行った。次節に示す3箇所(Site A, B, C)の崩壊箇所については、崩壊形状をトレースするためにハンディGPSを用いて測定した。単独測位ではあるものの、GPS衛星の捕捉数は10以上であり、良好な状態で崩壊形状の計測を行うことができた。ここでは1回目の調査と2回目の調査の写真とを並べて比較する。

3.2 現地調査結果

(1) Site Aの調査

Site Aの崩壊は、大規模な円弧すべりであった(図3(a))。図3(b)に示す通り、崩壊後の断面は大きく急傾斜部と比較的平坦な部分の2つに分

かれたバイリニアに近い。なお、図3(b)には、写真の撮影方向を矢印で示した。Site Aの崩壊は、全体で数カ所に分かれているが、最も大きな崩壊面の幅は約200m、その南側に土石流の跡が1箇所(図3(c))確認できた。緩斜面の下部(低いところ)から崩壊斜面頂部までは約52m、一段高い緩斜面の崩壊方向の長さは86m、下段の緩斜面は法尻から河川まで続く(100m以上、部分的に対岸)。急傾斜面の勾配は36°、その長さは水平距離で56m、高低差で41mであった。主に崩壊部分では脆い石灰岩が多く確認された。なお、冠頭付近では、大きなところで約20cm程度のテンションクラックが確認できた。

第2回の現地調査時、この地点について、崩壊箇所付近も土砂の堆積域に関しては一部が切り土されていた。その時の調査時の写真(図3(d))を見ると、崩壊箇所には部分的に約30cm程度の草が生育していた。滑落崖に関しては、植生は無く土が露出した状態であることを確認した。

(2) Site Bの調査

Site B(図4(a))はSite Aから北に約300m程度の距離にある。全体で一つの大きな崩壊と思われるが、間に2箇所の緑被が崩壊方向に細長く残っており、3つの崩壊面に分断している。調査では一番大きな真ん中の崩壊(緑被と緑被に囲まれた場所)を対象に実施した(図4(b))。図3と同様、図4(b)には、写真の撮影方向を矢印で示した。

上記の崩壊部分の幅は約150mであった。Site Aと同様、急傾斜部と緩斜面に分かれている。急傾斜部の傾斜は約26°、緩斜面の傾斜は約8.5°であり、急傾斜部の高さは35m、急傾斜面における崩壊方向の長さ(水平距離)は72mであった。なお、冠頭付近では、大きなところで約30cm程度のテンションクラックが確認できた。

第2回の調査時、Site Bの崩壊に関しても、Site Aと同様に滑落崖に関しては草の生育が無かったことを確認した。図4(c)に示す通り、Site Bの南側の崩壊箇所に関しても同様の特徴が見られた。しかし、Site Bの崩壊土砂の堆積域に関し

では 2 m から 3 m の草類が生育しており、InSAR 処理については困難が予想された(図 4 (d))。土の部分には雨水が通った筋がいくつも確認でき侵食が進んでいた。

(3) Site C の調査

Site C (図 5 (a)) も前述の崩壊箇所と同様、緩斜面と急傾斜部に分割できる。斜面右(南側)には水田があった。崩壊の幅は約 100 m であった。BM を設定し、そこから崩壊頂部までの角度(傾斜)を計測したところ約 17° であった。また、急傾斜部の傾斜角は約 30° であった(図 5 (b))。図

中の矢印は、写真の撮影方向である。

第 2 回の調査時、Site C の崩壊土砂の堆積域付近には、2 m から 3 m 程度の草が生育していた。Site C の堆積域には、図 5 (c) に示すような雨水の通り道(深さ約 1 m の溝)があった。また、図 5 (d) を見ると滑落崖も侵食され、オーバーハングしていた。さらに図 5 (d) の中央付近には、周囲と比較して新しく崩れたような跡も確認できた。これは、スコールによる土砂の侵食と考えられる。現地調査全体を通じて、鉛直方向の侵食は見られたが、崩壊が面的に拡大した場所は確認できなかった。

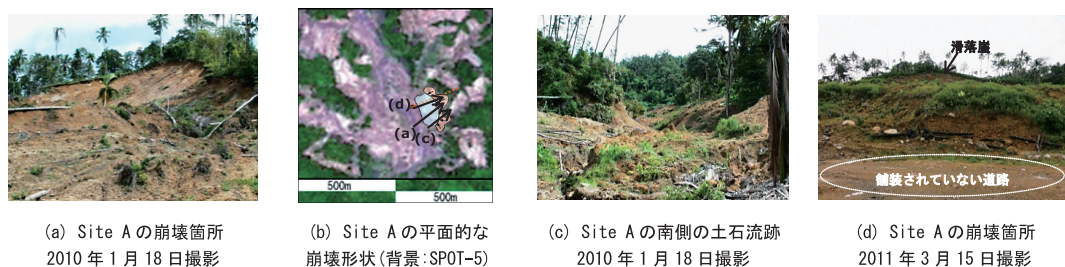


図 3 Site A の現地の様子

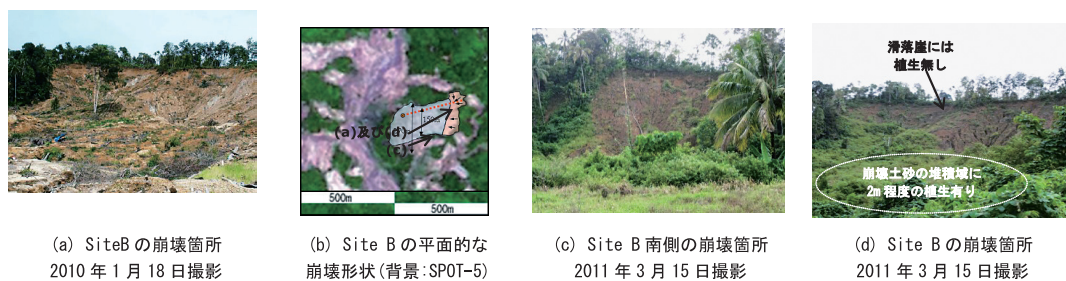


図 4 Site B の現地の様子

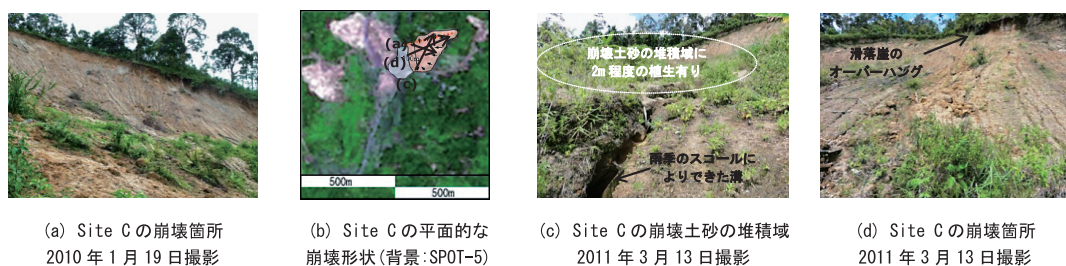


図 5 Site C の現地の様子

4. InSAR 処理による斜面崩壊形状の把握

4.1 InSAR 処理とコヒーレンス

SARはマイクロ波を地表に照射し、地表から散乱してきたエコーを記録する。これに信号処理を施して最終的に振幅と位相をもつ画像が生成される。振幅を表示した画像は一般的に強度画像と呼ばれるのに対し、位相情報を用いてSARを干渉計として用いるのがInSARである。本研究で使用したTDX画像は再訪問間隔が11日であり、表1に示す通り3月14日と3月25日に撮影されたものを使用した。なお、InSAR処理においては、前者をマスター画像、後者をスレーブ画像とした。なお、本研究では、ERDAS IMAGINE Radar Mapping Suiteを用いてInSAR処理を行った。

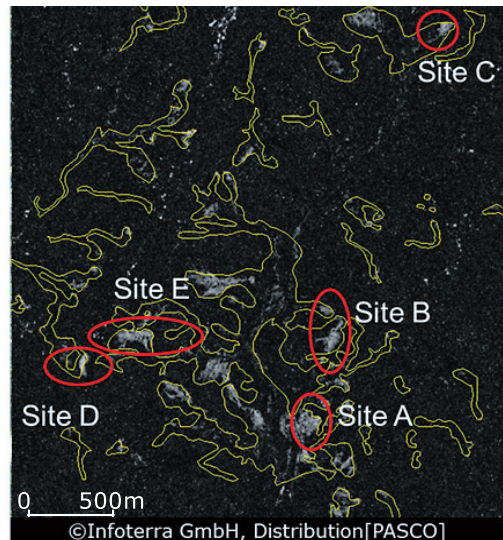
InSAR処理において、最も重要な要素は2つの画像間の相関である。測定された位相画像においてコヒーレンス γ は、その相関性を評価するのに用いられ、2つの画像間の正規化複素相互相関の絶対値として定義される。2つの画像が同一の場合には、 $\gamma = 1$ となり、全く相関の無い場合には、 $\gamma = 0$ の値をとる。Xバンドは波長が短いため、植生の葉の風による揺れや、その生長により干渉しなくなると考えられる。したがって、コヒーレンスを求めることにより山間部の裸地(崩壊箇所)と植生域を区分することができると考えた。

4.2 TDXのInSAR処理による斜面崩壊形状の把握

(1) 斜面崩壊の検出結果

InSAR処理によりコヒーレンスを求めた結果を図6に示す。なお、この図には参考のために地震直後に観測されたSPOT-5画像および現地調査結果を下に作成した崩壊箇所の境界線を黄色の実線で示した。崩壊箇所のうち、2011年3月現在でも土が崩壊箇所を覆う領域はコヒーレンスが高いことが判る。一方で斜面崩壊箇所周辺の植生域(主としてココナツ林)はコヒーレンスの値が低くなっており、前述のXバンドの特徴が改めて確認された。

コヒーレンス画像を二値化処理し斜面崩壊箇所として検出した結果とハンディGPSによる崩壊形



黄色線：地震直後の崩壊形状

図6 TDXによるコヒーレンス画像

状のトレース結果の比較を図7に示す。なお、二値化処理のしきい値は、参考のために0.3, 0.4, 0.5の3パターンを試みた。ハンディGPS測量により得られた崩壊箇所の境界線は平滑化し、赤色の実線で各図に示した。また、Site A(図7(a))およびSite B(図7(e))は、Falcon-PARSにより空撮オルソ画像を撮影しているため、比較のために背景画像として用いた。なお、一つの崩壊を特定するために、Site Aについてのみ盛土された箇所とその下の道路とを区分するためにポリゴンを切断して面積を求めた。切断線は、図7(a)から図7(d)に赤色の破線で示した。

図7(b)から(d)、図7(f)から(h)、図7(i)から(k)を比較すると、コヒーレンスが高い領域と土が露出した部分が良く対応していることが判る。また、崩壊地内の植生のかたまり(高さ:約30cm程度)の部分を除外して検出できていることが判る。また、滑落崖付近が検出漏れとなっており、堆積域側は誤検出箇所が見られるが、これは、オルソ補正の誤差と考えられる。また、どのSiteの検出結果においても、しきい値が下がるほど検出できた領域が増えているが、一方で細かいノイズも増えてくることが確認できた。

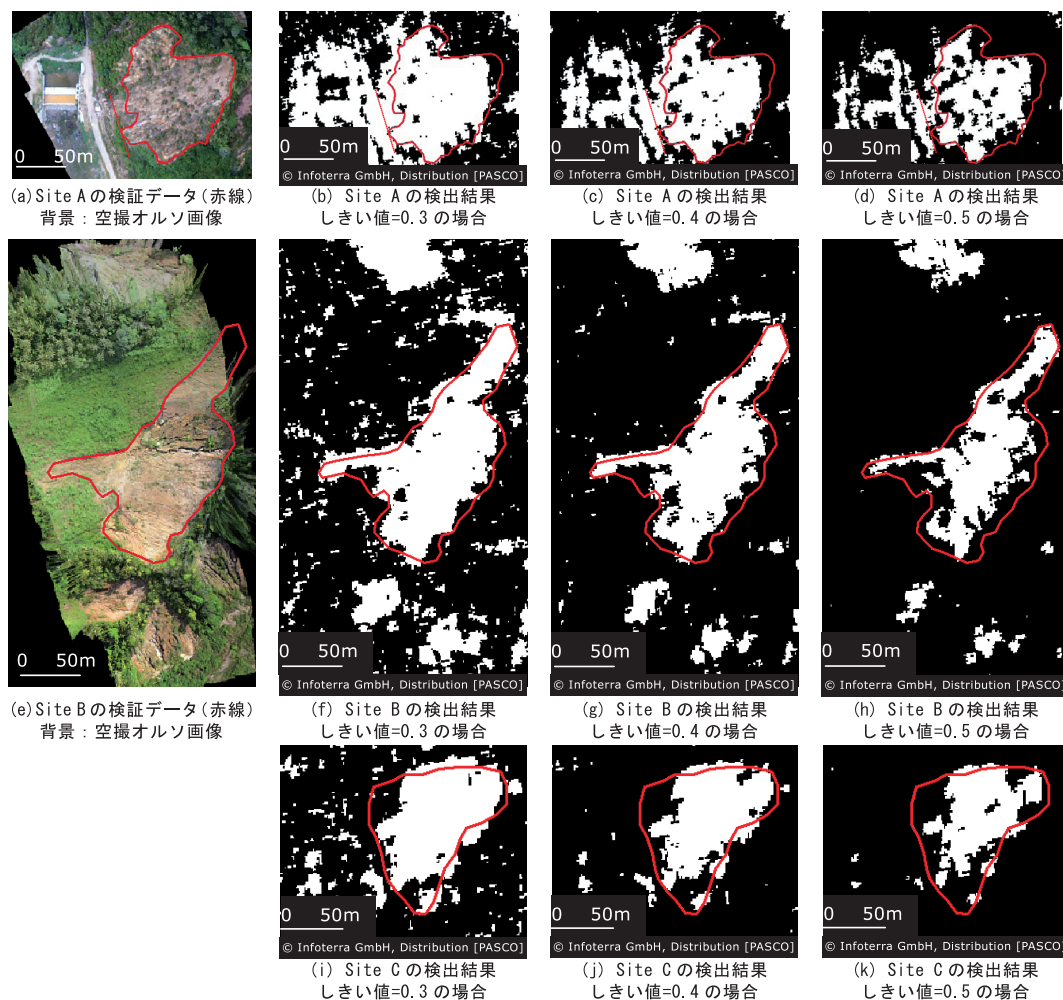


図7 斜面崩壊検出結果の比較(コヒーレンスのしきい値を0.3から0.5に変化させた場合)

(2) 検出精度の評価

本研究では、正解率、検出漏れ率、誤検出率を求めて検出精度の評価を試みた。正解率は、GPSによるトレース結果(検証データ)に対する一つの崩壊箇所内で検出できた面積の百分率とした。また、検出漏れ率は、GPSによるトレース結果(検証データ)に対する一つの崩壊箇所内で検出できなかった面積の百分率とした。したがって、正解率と検出漏れ率を加えると100%になる。また、誤検出率は、一つの崩壊として検出した箇所に対するGPSによるトレース結果(検証データ)以外

で検出した箇所とした。ただし、検証データの中には、高さが約30cm程度の植生も含まれるが、これらの領域も崩壊箇所として扱い検出精度の評価を行った。

表2は、しきい値を0.3とした場合、表3は、しきい値を0.4とした場合、表4は、しきい値を0.5とした場合の検出精度の評価をまとめたものである。しきい値が低くなるほど多くの画素が検出されるため、正解率は高くなるが誤検出率も増えていくことが判る。正解率と誤検出率の変化を見ると、しきい値を低く設定した方が良い結果が

表 2 検出精度の評価（しきい値=0.3の場合）

Site	検証データ	検出（正解）	検出漏れ	誤検出	正解率	検出漏れ率	誤検出率
Site A	12, 213 m ²	11, 096 m ²	1, 117 m ²	2, 408 m ²	90.9 %	9.1 %	19.7 %
Site B	12, 818 m ²	10, 335 m ²	2, 483 m ²	1, 918 m ²	80.6 %	19.4 %	15.0 %
Site C	5, 894 m ²	4, 601 m ²	1, 293 m ²	728 m ²	78.1 %	21.9 %	12.4 %
				平均	83.2 %	16.8 %	15.7 %

表 3 検出精度の評価（しきい値=0.4の場合）

Site	検証データ	検出（正解）	検出漏れ	誤検出	正解率	検出漏れ率	誤検出率
Site A	12, 213 m ²	10, 038 m ²	2, 175 m ²	1, 262 m ²	82.2 %	17.8 %	10.3 %
Site B	12, 818 m ²	9, 025 m ²	3, 793 m ²	552 m ²	70.4 %	29.6 %	4.3 %
Site C	5, 894 m ²	4, 003 m ²	1, 891 m ²	494 m ²	67.9 %	32.1 %	8.4 %
				平均	73.5 %	26.5 %	7.7 %

表 4 検出精度の評価（しきい値=0.5の場合）

Site	検証データ	検出（正解）	検出漏れ	誤検出	正解率	検出漏れ率	誤検出率
Site A	12, 213 m ²	8, 233 m ²	3, 980 m ²	663 m ²	67.4 %	32.6 %	5.4 %
Site B	12, 818 m ²	7, 078 m ²	5, 740 m ²	105 m ²	55.2 %	44.8 %	0.8 %
Site C	5, 894 m ²	3, 196 m ²	2, 698 m ²	189 m ²	54.2 %	45.8 %	3.2 %
				平均	59.0 %	41.0 %	3.2 %

得られているが、画像を見ると細かなノイズが急激に増えていた。したがって、しきい値は0.4以上の領域を抽出することで崩壊箇所を精度良く、また、ノイズも比較的少なく捉えることができることが確認できた。

5. まとめ

本研究では、2009年スマトラ島沖地震を誘因として発生した斜面崩壊の形状を推定するために、TDX 画像の InSAR 処理を試み、コヒーレンス画像を二値化することで斜面崩壊の検出を行った。なお、検証データは TDX の撮影日の間に現地調査を実施し、崩壊箇所の被覆状態等の調査を行って作成した。その結果、山間部においてコヒーレンスの値が0.4以上の領域を捉えることで、面的に崩壊形状を精度良く、また、ノイズも比較的少なく検出することができた。また、検出結果と空撮ヘリコプターによるオルソ画像とを比較することで、より厳密な解析結果の検証を行うことができた。

本研究では、大規模な斜面崩壊が数多く発生したスマトラ島バダンプリアマン県の G. Tigo 地区を対象として高分解能 SpotLight 画像 (HS 300 MHz) のペアを使用した。StripMap (標準シーンサイズ: 約30 km× 約50 km) のペアを用いた場合も同様に、山間部に限定してコヒーレンスの高い領域を絞り込むことで、広域での斜面崩壊箇所の把握に利用できると考えられる。また、本報告で提案する方法で地震前の画像のペアでコヒーレンスを求めておき、さらに地震発生直後とその11日後に2回の撮影を行ってコヒーレンスを求めることができれば、約2週間後には崩壊箇所の分布状況の把握が可能となるため、開発途上国にとって有用な情報を提供することができる。

謝辞

本研究は、株式会社バスコ主催の SAR 技術応用研究会の研究助成を受けて実施しました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 翠川三郎, 三浦弘之: 高分解能 SAR 画像による 2008年岩手・宮城内陸地震での斜面災害地域の抽出, 日本地震工学会論文集, Vol. 10, No. 3, pp. 25-31, 2010.
- 2) 鶴殿俊昭, 吉川和男, 望月貫一郎: 高分解能 SAR (TerraSAR-X) データのスタック画像を用いた洪水・土砂災害箇所の抽出, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 51, No. 3, pp. 132-133, 2012.
- 3) 辻野和彦, 河邑 眞, 辻子裕二: TerraSAR-X 画像を用いた斜面崩壊の検出法の検討, 第29回日本自然災害学会年次学術講演会講演概要集, pp. 135-136, 2010.
- 4) Makoto KAWAMURA, Kazuhiko TSUJINO, Yuji TSUJIKO and Jafril TANJUNG: Detection method of slope failures due to the 2009 Sumatra earthquake by using TerraSAR-X images, 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Symposium Proceedings, pp.4292-4295, 2011.
- 5) 大内和夫: 合成開口レーダ画像からの情報抽出技術と研究動向, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J89-B, No. 7, pp. 1024-1035, 2006.
- 6) 藤原 智, 飛田幹男, 村上真幸: 干渉 SAR による地殻変動検出と DEM の作成, 写真測量とリモートセンシング, Vol. 36, No. 3, pp. 71-76, 1997.
- 7) 小澤 拓, 上川英樹, 島田正信, 村上 亮, 飛田幹男, 矢来博司, 和田弘人, 雨貝知美, 藤原みどり, 藤田栄輔, 鶴川元雄: PALSAR/InSAR により得られた小笠原硫黄島の2006年火山活動活発化に伴う地殻変動(速報), 防災科学技術研究所報告書, pp. 11-22, 2007.
- 8) 朝香智仁, 西川 肇, 藤井壽生, 工藤勝輝, 岩下圭之, 山本義幸: InSAR DEM を利用した地すべり地域の推定~岩手・宮城内陸地震を対象として~, 日本リモートセンシング学会第49回学術講演会論文集, pp. 209-210, 2010.
- 9) Ling Lei, Yinqing Zhou, Jingwen Li, Roland Bürgmann: Persistent Scatter SAR Interferometry Application on Berkeley Hills Landslides, 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Symposium Proceedings, pp.4285-4287, 2011.
- 10) Gerardo Herrera, Davide Notti, Juan Carlos Garcia-Davalillo, Oscar Mora, Geraint Coolsley, Monica sanchez, Alain Arnaud, Michele Crosetto: Analysis with C- and X-band satellite SAR data of the Portalet landslide area, Landslides, Vol.8, pp.195-206, 2011.
- 11) V. Singhroy, K. Molch: Characterizing and monitoring rockslides from SAR techniques, Advances in Space Research, Vol.33, pp.290-295, 2004.
- 12) 例えば, 植野利康, 椎葉秀作: インドネシア・西ジャワ州南方沖地震及び西スマトラ州パダン沖地震災害報告, 砂防学会誌, Vol. 62, No. 4, pp. 66-69, 2009.
- 13) ドイツ航空宇宙センター, TanDEM-X-A New High Resolution Interferometric SAR Mission, http://www.dlr.de/hr/desktopdefault.aspx/tabid-23173669_read-5488/, 2012年2月1日アクセス確認.
- 14) Falcon-PARS, <http://www.bizworks.co.jp/UAV/Top.htm>, 2012年7月2日アクセス確認.
- 15) 辻子裕二, 河邑 眞, 辻野和彦, Jafril TANJUNG: 2009年スマトラ島沖地震による斜面崩壊の検出結果と現地調査による検証, 土木学会第65回年次学術講演会講演概要集, pp. 67-68, 2010.

(投稿受理:平成24年3月12日
訂正稿受理:平成24年10月5日)