



高分解能衛星画像と数値標高モデルを用いた 2004年新潟県中越地震での斜面崩壊地の検出

三浦弘之¹⁾、翠川三郎²⁾

- 1) 正会員 東京工業大学 都市地震工学センター 21世紀COE 研究員 博士 (工学)
e-mail: hmiura@enveng.titech.ac.jp
- 2) 正会員 東京工業大学 人間環境システム専攻 教授 工学博士
e-mail: smidorik@enveng.titech.ac.jp

要 約

高分解能衛星 IKONOS 画像および数値標高モデル (DEM) を用いて 2004 年新潟県中越地震での斜面崩壊地を検出する方法について検討した。多くの斜面崩壊地では、地震によって樹木などの植生が斜面下方に流出し、土壌が露出していることを利用して、画像から計算される植生指標 NDVI が地震後に顕著に減少する地域を斜面崩壊地として検出した。解析では、航空機レーザスキャナによる DEM を利用し、画像間の重ね合わせ誤差を小さくし、傾斜度を算出して平地を除去することにより誤検出を軽減させることを試みた。検出結果を航空写真の目視判読結果と比較したところ、全体の 85% 程度の斜面崩壊地を検出できること、検出結果の正解率は約 90% となることを示した。

キーワード: 2004 年新潟県中越地震, 高分解能衛星画像, 数値標高モデル, 斜面災害, 植生指標

1. はじめに

2004 年 10 月 23 日に発生した新潟県中越地震 ($M_j6.8$) では、震源近傍での家屋被害だけでなく、山間部において数多くの地すべりや斜面崩壊などの斜面災害が発生した。この斜面災害は道路の寸断や河道の閉塞をもたらし、山間部の集落の一時的な孤立、天然ダム形成による家屋の浸水や水没等の問題が生じた。このような災害の場合、被害が広い地域にわたって分布すること、道路の寸断等により現地調査が困難となる場合があること、から被害分布を把握することは容易ではない。ここで、広域災害における被害分布を早期に把握するのに、航空機や人工衛星からのリモートセンシングデータを用いることは有効な方法のひとつであると考えられる¹⁾。

新潟県中越地震においては、地震直後より航空機からの写真測量やレーザスキャナによる計測が行われ、それらの解析により地すべりや斜面崩壊などの斜面災害発生箇所が抽出されている²⁾。航空機からの空中写真は地表分解能が数十 cm 程度と解像度が高く、またレーザスキャナ測量では直接的かつ高精度に地形をとらえることができるため、地震前後のデータが得られれば斜面崩壊地をとらえることがで

きるものと考えられる。しかし、これらのデータが整備されている地域は限られており、必ずしも必要なデータが入手できるとは限らない。一方、人工衛星からのリモートセンシングデータは、航空機測量のような機材を用意する必要がなく、対象地域のデータを同時かつ広域に取得することができる、というメリットがある。特に、最近では IKONOS や QuickBird のように航空写真に近い 1m 程度の地表分解能をもつ衛星画像が容易に入手できるようになり、画像データが数多く蓄積されつつある。また、国際災害チャータ³⁾による取り組みから、大規模災害時に早期に画像データを取得できる体制が整備され、衛星画像が災害時の即時対応に利用できるようになりつつある。このため、高分解能衛星画像を利用して地震被害箇所を簡便に検出する方法を検討することは、地震防災上重要であると考えられる。

衛星画像を利用して災害発生箇所を検出する方法としては、目視判読による方法と画像処理による半自動的な方法がある。目視判読による方法は、新潟県中越地震での IKONOS 画像にも適用されており⁴⁾、比較的精度は高いものの、広域の画像を解析するには膨大な労力と時間を要するという問題がある。画像処理による検出方法として、イベント前後のピクセル値の差分や相関等の変化から変化域を評価する方法^{5) 6)}が、斜面崩壊地の検出にも適用されている^{7)~11)}。また、新潟県中越地震では、レーダ画像による斜面崩壊地の検出も試みられている¹²⁾。しかし、これらの研究では、比較的狭い範囲での特定の斜面崩壊地の結果を示すのみであったり、検出された分布が実際の被害分布と大まかに対応することを示すのみであり、広域の画像による検出結果と実際の斜面崩壊地分布とを詳細に比較・評価した例はみあたらない。

このような背景から、筆者らは新潟県中越地震の被災地を撮影した地震前後の IKONOS 画像を用いて、斜面崩壊地を画像処理によって検出する方法について基礎的な検討を行ってきた^{13) 14)}。しかし、これらの検討では斜め撮影された IKONOS 画像のみを用いて地震前後の画像を重ね合わせていたために、起伏の激しい地域では重ね合わせ誤差が大きく、変化を精度よくとらえることは困難であった。また、植生の変化のみから被害の有無を判定していたために、平地などにおける誤検出も少なからずみられた。そこで本研究では、航空機レーザスキャナ測量で得られた数値標高モデル (Digital Elevation Model: DEM) を解析に取り込むことで、画像の重ね合わせ精度を向上させるとともに、平地における誤検出を軽減させることによって、高分解能衛星画像から斜面崩壊地を目視に頼ることなく検出する一手法を提案し、その適用性について検討することを目的とする。

2. 使用したデータと検出方法の概要

本研究で使用した地震前後の IKONOS 画像の諸元を表 1 に、画像範囲を図 1 に示す。地震前の画像については図 1 中の点線より左側の A で示す範囲は 2002 年 4 月 29 日に撮影されたものであり、点線より右側の B で示す範囲は同年 4 月 15 日に撮影されたものである。地震後の画像は、地震翌日の 2004 年 10 月 24 日に撮影されたものを使用した。画像範囲は旧山古志村や川口町中心部、同町武道窪、旧堀之内町竜光といった震源域を含む、南北約 9km、東西約 6.5km の範囲である。画像の地表分解能は 1m であり、可視域 3 バンド (RGB) と近赤外域 1 バンドの計 4 バンドからなる。なお、図 1 の画像は次章で述べるオルソ幾何補正を施したものである。撮影時の衛星方向や太陽方向は表 1 に示す通りである。

また本研究では、航空機搭載レーザスキャナで取得された数値表層モデル (Digital Surface Model) から、フィルタリング処理によって建物や樹木などの地表物を除去した DEM (朝日航洋株式会社作製) を利用した。データは地震後の 2004 年 10 月 28 日に取得され、データの地表解像度は 2m である。使用した DEM による標高の分布を図 1 に併せて示す。

ここで、地震前後の IKONOS 画像の拡大図を図 2(a-1)、(a-2)に示す。この地域では、図中の破線丸で示す箇所が斜面崩壊が発生した。地震後の画像から、崩壊により地震前にあった樹木等の植生が流出し、土砂が露出している様子がみられる。各画像から式(1)に基づいて植生の活性度を表す NDVI (Normalized Difference Vegetation Index : 正規化植生指標)¹⁵⁾を算出した。

表1 使用した IKONOS 画像の諸元

撮影時期	年月日	時間	撮影(衛星)方向		太陽方向		地表分解能	
			角度(度)	仰角(度)	角度(度)	仰角(度)		
地震前	A	2002年4月29日	AM 09:48	N226E	78	N148E	64	1 m
	B	2002年4月15日	AM 09:38	N117E	77	N147E	59	1 m
地震後		2004年10月24日	AM 10:03	N250E	54	N172E	41	1 m

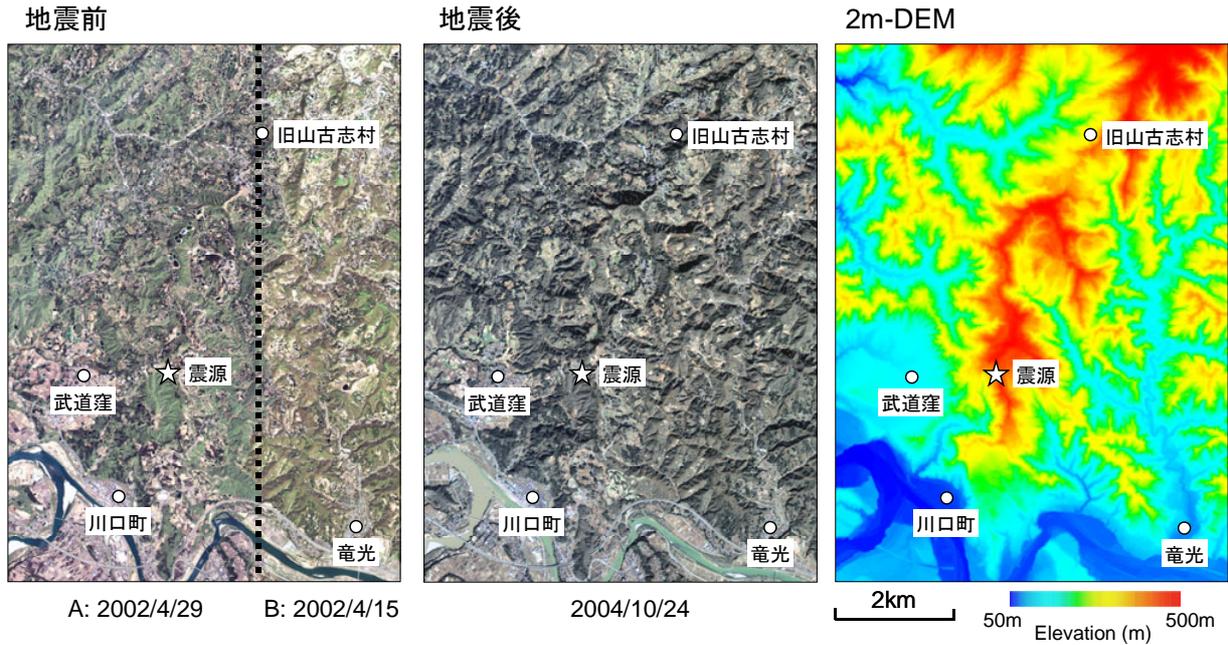


図1 使用した地震前後の IKONOS 画像と 2m メッシュの数値標高モデル (DEM)

$$NDVI = \frac{DN_{NIR} - DN_{Red}}{DN_{NIR} + DN_{Red}} \quad (1)$$

ここで、 DN_{NIR} と DN_{Red} はそれぞれ近赤外域バンドのピクセル値と可視域赤色バンドのピクセル値を表す。NDVIは-1から+1までの値をとり、値が大きくなるほどピクセル内における植生の活性度が高いことを表している。算出したNDVIの分布を図2(b-1), (b-2)に示す。図中にて赤色に近づくにつれてNDVIが高いことを表している。地震前後の画像を比較すると、斜面崩壊が発生した地域では、樹木等が流出したために、明らかにNDVIが低下していることがわかる。このため、NDVIが地震後に顕著に低下している地域を抽出することで、斜面崩壊地を検出できるものと考えられる。

NDVIを利用した斜面崩壊地の検出方法の流れを図3に示す。まず画像間のピクセル値の差分をできるだけ正確に算出するために、DEMを用いて両画像をオルソ幾何補正する。次に、差分を算出する際に生じる画像間の位置誤差の影響を軽減するために、画像の平滑化を行う。また、地表の状態が確認できない影領域を抽出・除去し、NDVIを算出する。一般に斜面災害などの変動がない地域においても、季節的な植生の変動などがあり、画像間のNDVIには違いがみられる。このような季節変動の影響を軽減するために地震後のNDVIの補正を行う。

次に、地震前後の NDVI の差分を算出する。ここで、斜面災害は平地では発生しないものと仮定し、DEM を用いて平地となる領域を除去する。さらに 20m 程度のメッシュを作成し、実際の斜面崩壊地におけるメッシュ内の NDVI 差分値の特徴を検討し、閾値処理を施すことによって斜面崩壊地を検出する。

3. 高分解能衛星画像と数値標高モデルによる斜面崩壊地の検出

3.1 画像の事前処理

最初に地震前後の画像の位置合わせを行う。表 1 に示すように撮影時の衛星の仰角をみると、地震前の画像は 77, 78 度と比較的高角であるのに対して、地震後の画像は緊急的にセンサを傾けて撮影したために、54 度とやや低角となっている。衛星の仰角が低いと、対象地域のように起伏の激しい地域では、山地が撮影方向に倒れ込んだように撮影される。このような画像をその他の画像と重ね合わせようとすると、地形の影響により画像間の重ね合わせが困難となる。そこで、画像間の重ね合わせをより高精度に行うために、DEM を用いて画像のオルソ（正斜投影）幾何補正を試みた。

オルソ補正では、IKONOS 画像と DEM からそれぞれ基準点となるリファレンス・ポイントを 50~60 点程度抽出し、DEM に重なるよう画像の位置補正を行った。画像のリサンプリングには最近隣内挿法¹⁶⁾を用いた。なお、厳密には地震によって斜面変動が発生した地域の標高は、地震前と比べると変化しているものと考えられるが、地震前のレーザデータは得られていないこと、現状では地震前後のレーザデータが得られるケースは少ないことから、本研究では地震後の DEM を利用して地震前の画像の補正も行った。このとき、基準点はできるだけ斜面変動の影響が小さいと思われる地点を選択した。ここで、DEM を利用せずに画像のみを用いて位置合わせを行うと、画像間の誤差は平均的に約 13m となっていたが¹⁴⁾、オルソ補正した画像間の誤差は約 3.5m となった。

次に各画像に平滑化を施した。ここで、画像間の位置誤差は約 3.5m であったことから、平滑化には 5×5 ピクセル（約 5×5m）のウィンドウを用い、ウィンドウ内にある全ピクセル値の平均値を、中心ピ

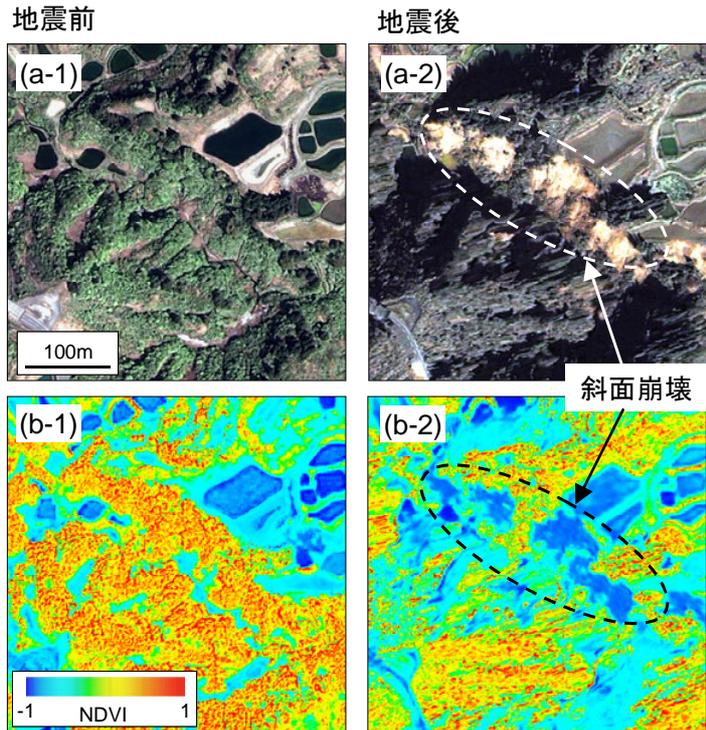


図 2 (a-1), (a-2) 斜面崩壊地における地震前後の IKONOS 画像の比較 (b-1), (b-2) NDVI 画像の比較

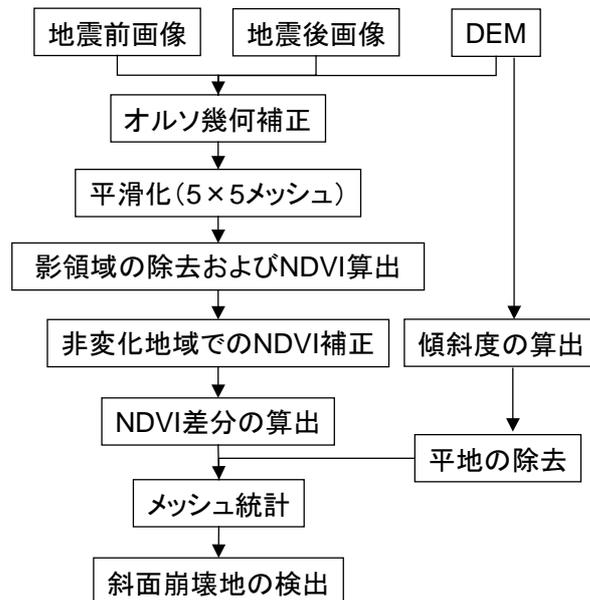


図 3 NDVI による斜面崩壊地の検出の流れ

クセルの値として代入した。また、図2をみると樹木等の影が撮影されている箇所では、地表面の状況を把握することは困難であることがわかる。このような地域では植生の変化を正しくとらえることはできない。このため、地震前後の画像から影となる領域を抽出し、解析から影領域を除去した。影領域の抽出には、既往の研究による方法¹⁷⁾と同じく、近赤外域バンド画像のヒストグラム形状から、谷間となるピクセル値を閾値として、閾値以下のピクセルを全て影領域として抽出した。閾値は両画像ともピクセル値の最大値の約15%の値とした。また、影領域の占める割合は、地震前後の画像でそれぞれ全体の約6%および約14%であった。

次に、上述の式(1)を用いて各画像のNDVIを算出する。ここで、NDVIの差分を算出する際、従前の研究^{13),14)}では単純に地震前後のNDVIの差を計算していた。用いる画像の撮影時期にほとんど違いがなければ単純な差分により変化をとらえることが可能である。しかし、本研究で使用する画像の撮影時期は4月と10月と異なるため、斜面災害などの変化のない地域でもNDVIには季節変化がみられる。この影響を除去するために、非変化地域における地震後のNDVIを地震前のNDVIと同程度になるよう補正することを試みた。地震前後の画像に対して、斜面災害が発生しておらず、かつ土地被覆状況に大きな違いがみられない地域から計10万ピクセル程度抽出し、地震前後の画像のNDVIを比較した。ここで、抽出されるNDVI値の範囲が狭くならないように、NDVIの高い緑地や傾斜地のほかに、NDVIの比較的低い住宅地などからもピクセルを抽出した。

地震前後のNDVIの比較を図4に示す。図の左側は図1の地震前画像のAで示す範囲における画像間の比較を、図の右側は図1の地震前画像のBで示す範囲における比較をそれぞれ示す。図の横軸は地震前画像のNDVIを表し、縦軸は地震後のNDVIを表す。地震前の画像ではNDVIが-0.7から0.7程度まで幅広く分布しているのに対して、地震後のNDVIはほとんどが0から0.7程度に集中しており変動の幅が狭いことがわかる。これは、地震後画像において大気の状態や撮影角度などの撮影条件が悪く、画像の質が比較的低いことを示唆しているものと考えられる。地震前後のNDVIは概ね線形関係にあり、それぞれの画像範囲に対して最小二乗法により求めた一次関数と相関係数を図中の赤線と式に示す。Aの範囲の画像は相関係数が0.9程度と高く、Bの範囲の画像は0.8弱とやや相関が低かったものの、両者の関係を概ね表現できていたものと考えられる。そこで、図中に示した相関式に基づく(2)式を用いて、範囲A、Bそれぞれに対して地震後画像のNDVIの補正を行った。

$$NDVI_{After_corrected} = (NDVI_{After} - 0.266) / 0.519 \quad ; \text{範囲 A の場合} \tag{2}$$

$$NDVI_{After_corrected} = (NDVI_{After} - 0.219) / 0.689 \quad ; \text{範囲 B の場合}$$

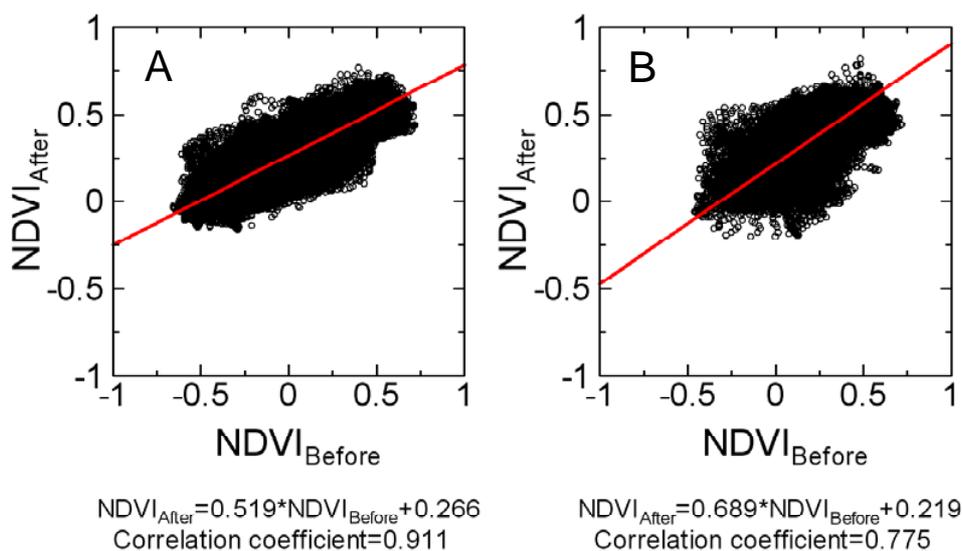


図4 非変化地域における地震前後のNDVIの比較

ここで、 $NDVI_{After}$ は元の地震後 NDVI で、 $NDVI_{After_corrected}$ は補正後の地震後 NDVI を表す。地震前、地震後（原画像）および地震後（補正後）画像の NDVI のヒストグラムを図 5 に示す。図の横軸は NDVI の大きさを表し、縦軸は頻度を表す。地震後の原画像の NDVI をみると、A、B の範囲ともに地震前の NDVI とは分布が大きく異なっているのに対して、補正後の分布は地震前のものに近づいている様子が確認できる。

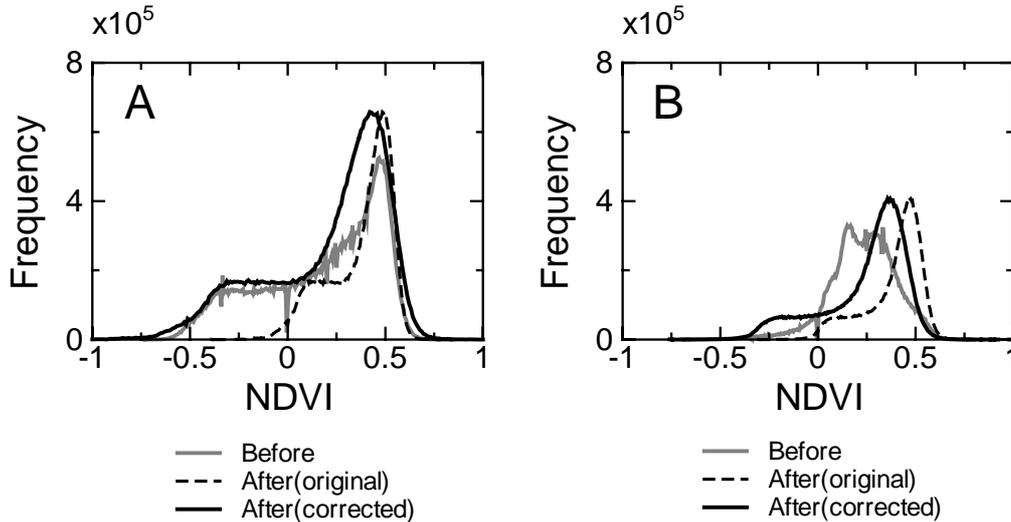


図 5 地震前、地震後（原画像）、地震後（補正後）の画像における NDVI の分布

3.2 NDVI 差分値の特徴

地震前の NDVI から地震後の NDVI を差し引き、NDVI の差分（以下、D 値）をピクセルごとに算出する。画像 A および B の範囲での D 値のヒストグラムを図 6 に示す。地震後に植生が減少した場合、D 値は正となる。いずれの画像においても D 値は正規分布に近い形状を示していることがわかる。植生地域では季節による植生の量や密度の変化によって、裸地では土壌の水分量や日光の当たり具合等の撮影条件によって NDVI はそれぞれ変動する。このため、NDVI の差分には、斜面崩壊による変動に加えて、季節や撮影条件等の違いによる変動が混在することから、D 値は正規分布に近い形状になるものと考えられる。このような正規分布を示す場合、ヒストグラムから植生が顕著に減少したことを表す閾値を決定することは困難である。そこで、閾値について検討するため、図 6 中の点線で示すように閾値を①平均値+標準偏差、②平均値+1.5×標準偏差、③平均値+2×標準偏差、④平均値+3×標準偏差、の 4 つを設定した。そして、抽出されるピクセルの分布を実際の画像と比較し、適合度の高いものをその閾値として採用することとした。それぞれの閾値を設定した場合、閾値以上に含まれるピクセル数の割合は全体の約 16%、約 6.5%、約 2.5%、約 0.14%となる。

図 7(a)は図 2 と同じく斜面崩壊が発生した地域の原画像を表し、図 7(b)は①～④までの閾値を設定したときに抽出されるピクセルの分布を重ね併せた図を表す。原画像と抽出されたピクセル分布を比較すると、①のケースのように閾値が比較的低い場合、多くのピクセルが抽出されるが、樹木の影周辺など非変化地域でピクセル値がやや低い箇所が数多く誤抽出される傾向がみられる。②のケースにおいても、南西の山間部では植生の変化はほとんどみられないものの、閾値がやや低いため多くのピクセルが誤抽出されていることがわかる。一方、③や④のケースのように閾値を高くすると抽出されるメッシュは少なくなり、顕著に植生が減少している地域の大部分が抽出されている様子が確認できる。③と④のケースを比較すると、図中の白矢印で示すように、④のケースでは閾値が高すぎて一部抽出されていない箇所がみられる。一方、③のケースによる結果をみると、植生が流出している箇所は概ね抽出されている様子が確認できる。このことから、今回は③のケースでの閾値を採用することとした。つまり、D 値が閾値（平均値+2×標準偏差）以上を示すピクセルを植生が顕著に減少したピクセル、すなわち斜面崩

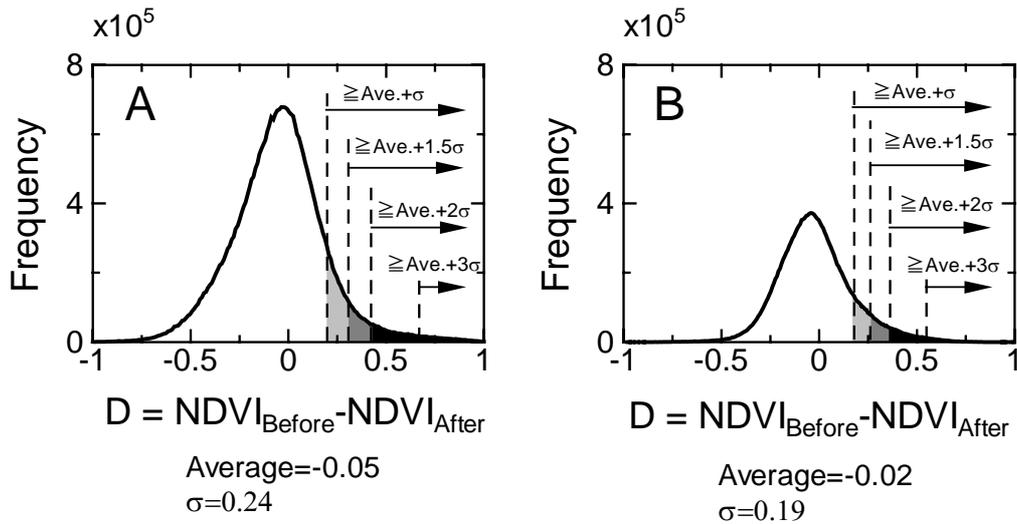


図6 地震前 NDVI と地震後 NDVI の差分分布

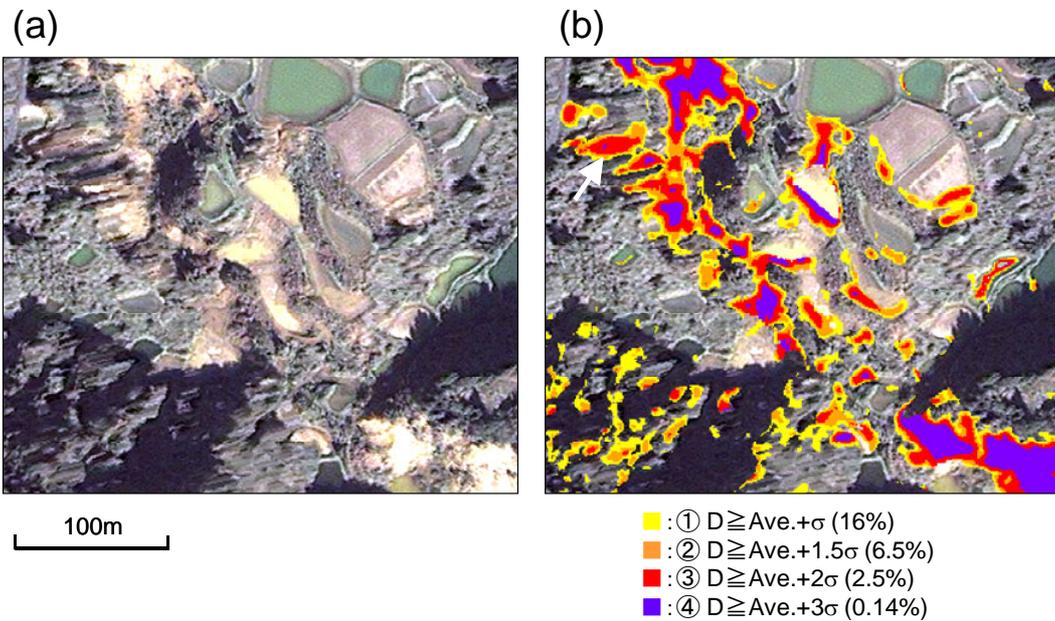


図7 (a) 地震後の原画像, (b) 各閾値で抽出されるピクセルの分布 (括弧内のパーセンテージは対象となるピクセルが画像全体に占める割合を表す)

壊が発生した可能性のあるピクセル (以下, P_F) として抽出することとする。

抽出された P_F の分布を図 8(a)に示す。図中の赤色で示す箇所が抽出されたピクセルを表す。これを見ると、斜面崩壊が発生した箇所において多くのピクセルが抽出されているものの、南側の信濃川付近や水田地域など斜面以外の平地においても多くのピクセルが抽出されていることがわかる。これは、河川や水田の水量が画像間で異なるために水域と陸域の境界付近が変化域として抽出されてしまったこと、また画像間で水の濁り度合いが変化したために変化域として抽出されてしまったこと、等が原因として考えられる。このような平地における変化域を除去するため、DEM を利用して傾斜の小さい地域を解析から除去する。オルソ幾何補正に用いた分解能 2m の DEM を利用し、既往の手法¹⁸⁾を用いてピクセルごとに傾斜度を算出した。ここで算出された傾斜度は、近隣の 9 ピクセルの標高値を最もよく説明する平面を最小二乗法で当てはめたときの、最大傾斜方向の傾斜を表す。算出された傾斜度の分布図を図 8(b)

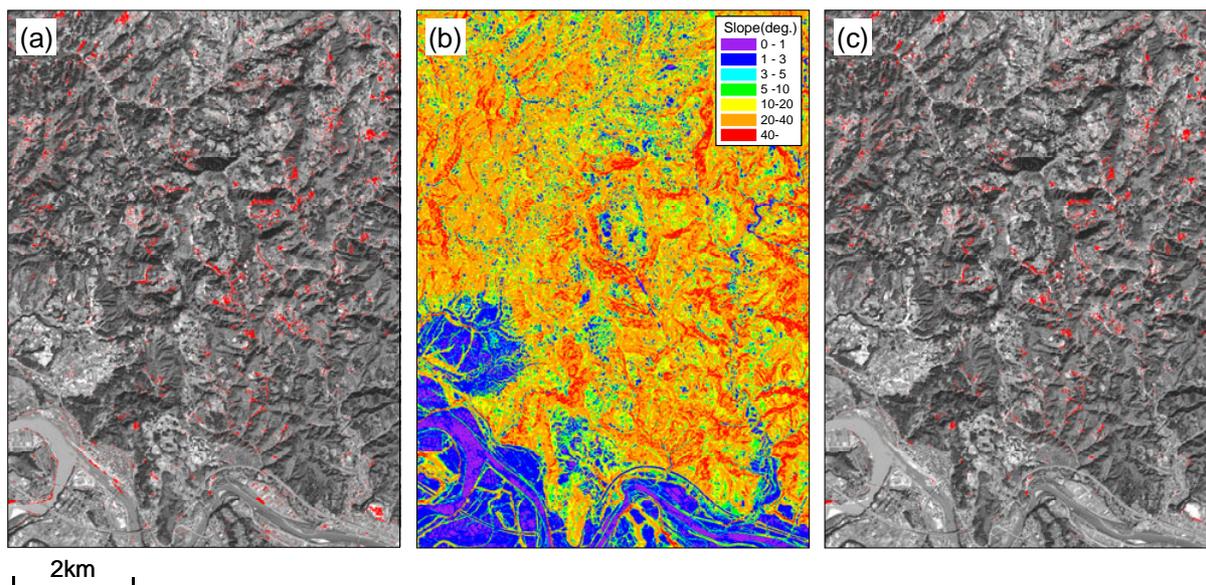


図 8(a) D 値が「平均値+2×標準偏差」以上のピクセル (P_F) の分布 (赤色), (b) DEM から計算された傾斜度分布, (c) 傾斜 10 度未満の範囲を除去後の P_F 分布 (赤色)

に示す。南側の河川周辺や水田地域では傾斜度が 10 度未満のピクセルが分布しているのに対して、北側の山地では 10 度以上のピクセルが広く分布している。

図 9(a)に地震後画像の拡大図を、図 9(b), (c)に標高分布と算出された傾斜度の分布をそれぞれ示す。傾斜度の分布図では、10～20度までの範囲を細かくみるために図 8 の凡例と色分けを変えている。また、傾斜を考慮せずに抽出した場合の P_F 分布を図 9(d)に示す。この地域では、図 9(a)中の赤点線丸で囲った箇所において斜面崩壊が生じており、 P_F としてピクセルが多く抽出されているものの、中央部の平坦なグラウンド上においても NDVI が減少した箇所が数多く誤抽出されていることがわかる。この原因として、土壌の水分含有量や日光の当たり具合が画像間で異なる等の理由により、輝度が変化することが可能性として指摘できる。

図 9(c)の傾斜分布をみると、平坦な地域における傾斜度は概ね 10 度未満であり、斜面崩壊が発生している箇所は 10 度以上の傾斜を示している地域であることがわかる。その他の地域でも、崩壊地の一部が傾斜 10 度未満になるものはいくつかみられたが、崩壊地全体が傾斜 10 度未満となる崩壊地はみられなかった。過去の地震での崩壊事例では、傾斜が 15 度以上になると斜面崩壊の発生件数が多くなり、30 度から 60 度程度までのものが最も多く、10 度未満のものはほとんどないことが指摘されている¹⁹⁾。そこで本研究では、傾斜度が 10 度未満の地域では、斜面崩壊による影響がほとんどないものとして解析対象から除去した。図 9(e)に 10 度未満の箇所を除去した P_F 分布を示す。平坦な地域における P_F は除去されている一方で、斜面崩壊箇所では P_F が抽出されていることがわかる。画像全体において傾斜 10 度未満を除去した P_F の分布を図 8(c)に示す。図 8(a)と比較すると、特に南側の平坦な箇所ではピクセルが除去されている様子が確認できる。

図 9(e)で示したように、上記までに抽出された変化域は 1m のピクセル単位で抽出されているため、ごく小規模な変化も誤抽出してしまう可能性がある。また、1m ごとの解析結果の分布をみても、抽出される領域が小さいと、一見してどこに斜面崩壊が生じたのかを把握することが困難な場合がある。そこで、斜面崩壊以外の規模の小さな変化域を除去し、斜面崩壊地分布をより明確にとらえるため、ある程度の大きさをもつメッシュごとの P_F の分布について検討することとした。ここで、メッシュの大きさについて検討するため、航空写真の目視判読により作成された災害状況図²⁰⁾を用いて斜面崩壊の規模を調べた。これによると、崩壊長さが 100m 以上の大規模な崩壊は全体の約 10%を占め、長さ 50～100m のものは約 25%、長さ 20～50m のものが約 60%であり、長さ 20m よりも小規模なものは全体の 5%弱と

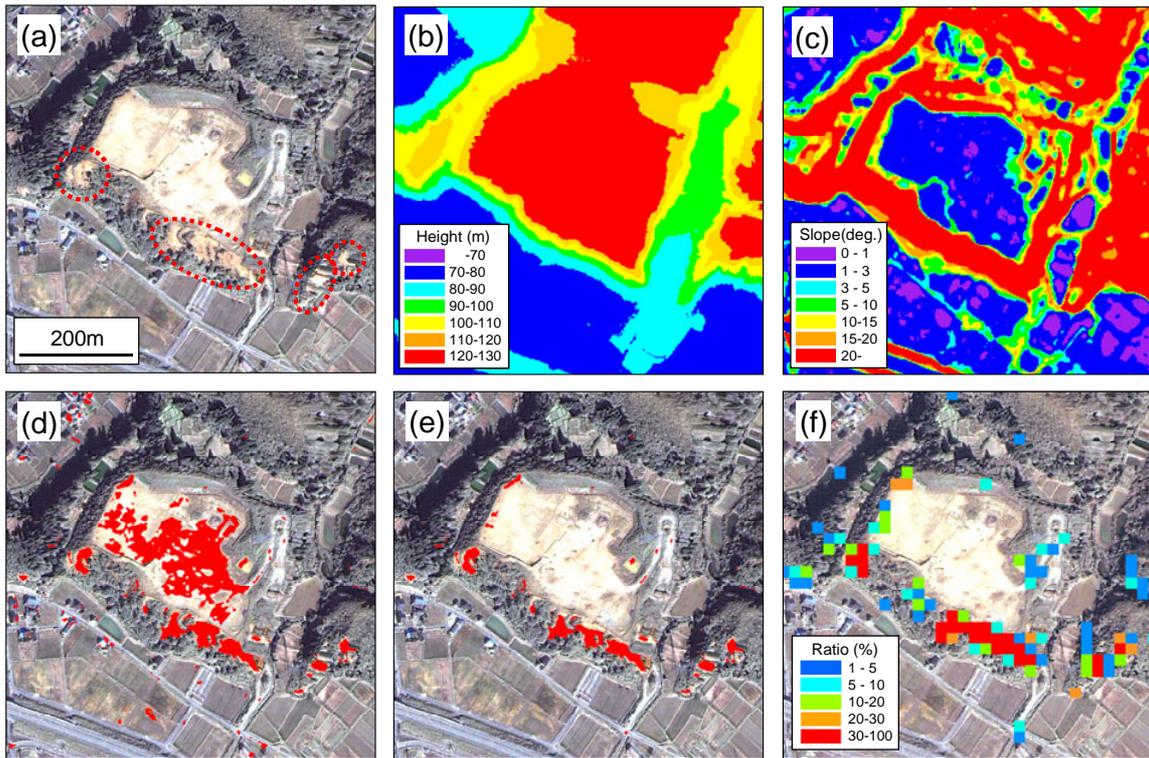


図9 (a) 地震後画像（赤点線で囲った箇所では斜面崩壊が発生している）、(b) 標高分布、(c) 傾斜分布、(d) P_f 分布（赤色）、(e) 傾斜10度未満の範囲を除去後の P_f 分布（赤色）、(f) 20m メッシュ内に含まれる P_f の割合分布

少なかった。災害状況図に掲載されていない小規模な崩壊があった可能性も完全には否定できないが、その割合は小さいものと考えられ、斜面崩壊を評価するメッシュの大きさを20mとすれば、大部分の崩壊を評価できるものと考えられる。そこで、解析範囲全体を20mメッシュに区分し、各メッシュ内における P_f の占める割合を算出した。

図9の範囲において算出された20mメッシュでの P_f の割合分布を図9(f)に示す。図をみると、割合が10%未満のメッシュのほとんどは斜面崩壊以外のごく小さな変化を表しており、また10~20%のメッシュについてもグラウンド周辺部にみられるように、斜面崩壊でない変化を表しているケースが多い。一方、斜面崩壊地ではある程度まとまって P_f が抽出されるため、20%以上の高い割合を示すメッシュが多く分布していることがわかる。そこで本解析では、 P_f の割合が20%以上を示すメッシュを斜面崩壊地として検出することとした。

4. 検出結果の評価

新潟県中越地震における斜面崩壊のタイプとしては、表層崩壊、浅層崩壊、深層地すべり、土砂の流体性移動、の4つに分類され、全体として表層崩壊や浅層崩壊が多くを占める。特に、崩壊地面積の比較的小さなものは表層崩壊および浅層崩壊がほとんどであり、面積が大きなものには崩壊土砂量の多い深層地すべりが含まれる²¹⁾。以降では、本手法による検出結果と崩壊地面積や崩壊タイプとの関係について検討する。

前章までの解析により対象範囲全体で検出されたメッシュの分布を図10(a)に示す。比較のために、航空写真の目視判読により作成された斜面崩壊分布図²⁰⁾を図10(b)に示し、両者を重ね合わせた図を図10(c)に示す。検出結果と目視判読結果を比較すると、検出されたメッシュの分布は実際の斜面崩壊地の分布

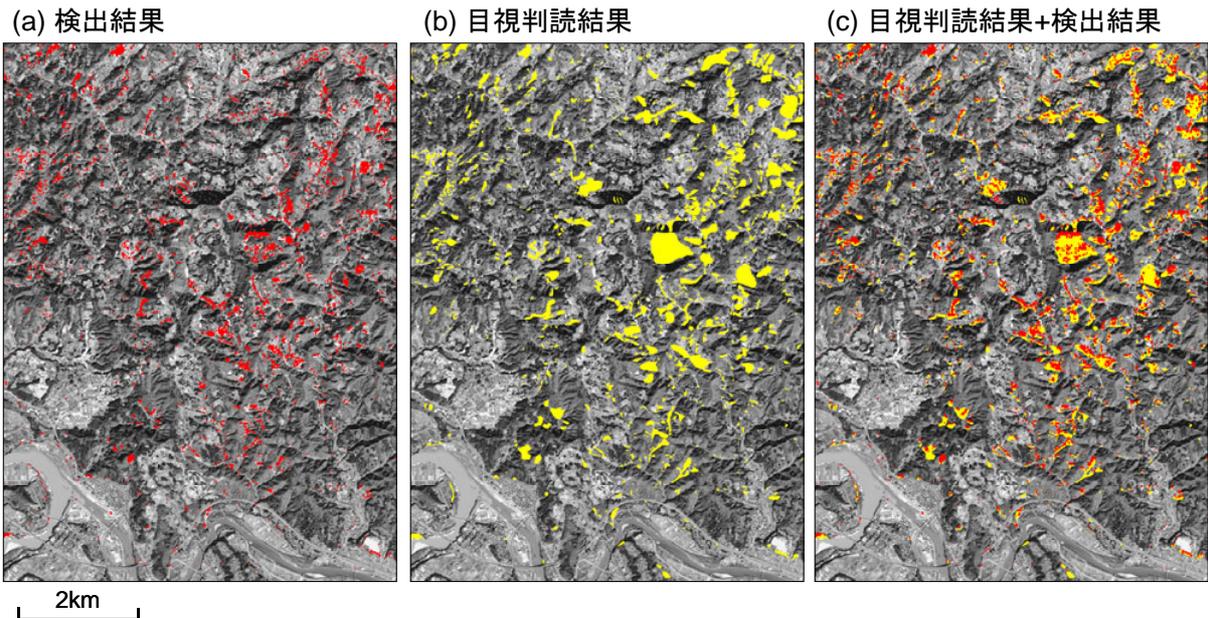


図 10 (a) 検出結果 (赤色), (b) 航空写真による目視判読結果 (黄色),
(c) 目視判読結果と検出結果の重ね合わせ

表 2 崩壊地面積と検出結果の関係

崩壊地面積(m ²)	検出成功数	未検出数	検出率(%)
500未満	58	48	54.7
500~1,000	128	37	77.6
1,000~2,000	180	26	87.4
2,000~5,000	189	19	90.9
5,000以上	169	5	97.1
計	724	135	84.3

と概ね対応しており、本手法が斜面崩壊地の大きな分布を把握する上で有効であることがわかる。

ここで、後述するように深層地すべりのような崩壊タイプの場合、崩壊領域全体をもれなく抽出することは困難な場合があることから、ここでは目視判読された崩壊地の範囲内に検出されたメッシュが存在する場合を検出成功と判別した。検出成功した崩壊地とメッシュが検出されずに未検出となった崩壊地の個数を調べた。なお、目視判読結果によると対象範囲には計 859 ヶ所の斜面崩壊地が存在した。検出成功数と未検出数の関係を崩壊地面積ごとに示したものを表 2 に示す。表中には、検出成功数を検出成功数と未検出数の和で除したものを検出率として示している。面積が 500m² 未満の崩壊地については、検出率は 50% 強程度と比較的低いものに対して、面積が大きくなるにつれ検出率は増加し、1,000m² 以上の規模の大きな崩壊地については検出率は概ね 90% 以上を示しており、全体として斜面崩壊地の約 85% を検出できることがわかった。

未検出となった原因は大きく以下の 3 つに分けられる。すなわち、①明瞭な滑落崖がみられず地表上に植生の変化がみられないもの、②目視では崩壊がある程度確認できるものの NDVI の変化が閾値以下で検出されなかったもの、③崩壊地全体が樹木や山腹の影に隠れてしまっているもの、である。それぞれの個数を崩壊地面積ごとにまとめたものを表 3 に示す。

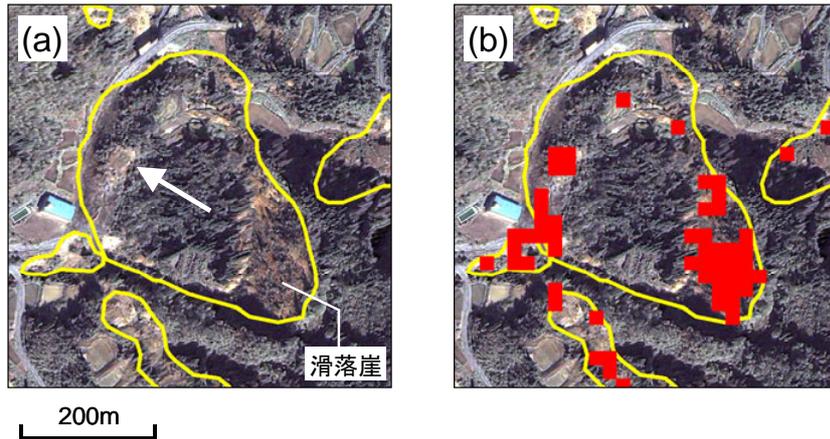


図 11 (a) 東竹沢地区における地すべり（黄線が崩壊地）、
(b) 検出結果（赤色）

表 3 未検出だった斜面崩壊地の内訳

崩壊地面積(m ²)	①植生分布に変化が みられなかったもの	②植生変化が閾値 以下だったもの	③影に隠れて しまったもの	計
500未満	0	45	3	48
500～1,000	4	26	7	37
1,000～2,000	4	14	8	26
2,000～5,000	10	3	6	19
5,000以上	3	1	1	5
計	21	89	25	135

①のケースについて検討するために、実際の崩壊地を拡大したものを図 11(a), (b)に示す。これは東竹沢地区で発生した再滑動型の深層地すべりであり²¹⁾、対象地域の中でも大規模な斜面災害のひとつである。図中の黄線が地すべり全体の範囲を表している。図をみると、南東側の滑落崖がみられる箇所では植生が減少しているために、本手法によりうまく検出されているものの、地すべりにより北西側に移動した箇所については地表上の植生に大きな変化がみられずに検出されていない箇所もみられる。図 11 のケースでは滑落崖が比較的明瞭なために検出成功となったが、滑落崖が確認できない場合には①のケースとなり、植生変化がほとんどないために本手法によって検出することが困難であった。①のケースにおける崩壊タイプを調べたところ、そのほとんどは深層地すべりに分類されるものであった。一方で、表層崩壊、浅層崩壊や土砂の流体性移動といった崩壊では、植生や土砂が流出し、滑落崖が明瞭に現れる場合が多かった。このことは、本手法が深層地すべりに対しては検出がやや困難となる場合があるものの、その他の崩壊タイプの検出には有効であることを示している。また、①のケースは未検出の約 15%と数が限られており、本手法の検出精度を大幅に低下させるものではない。

未検出の約 85%を占める②や③のケースでは、本研究で使用した地震後画像が、表 1 や図 4 に示したように撮影仰角が低いために影が多く、NDVI のコントラストがやや低いものであったために、未検出となったものと考えられる。②のケースにより未検出だった崩壊地は面積の比較的小さなものが多かった。地震前後の画像として撮影仰角が高くコントラストの良い画像が得られれば、このような未検出は減少するものと考えられる。

なお、解析により検出されたメッシュ数 6,019 メッシュのうち、誤検出数は 595 メッシュであった。本手法により検出されたメッシュが斜面崩壊地をとらえているか否かを表す正解率は約 90%となり、精

度よく崩壊地を検出できることがわかった。誤検出されたメッシュは、階段状に分布する田や池の傾斜部分や建物の屋根面、道路の一部などであった。誤検出された箇所の多くは、地震後画像のコントラストがやや低いために斜面崩壊との違いを判別しにくいものであった。このため、未検出のケースと同様に、コントラストの良い地震前後の画像が得られれば誤検出数もより減少するものと考えられる。

5. 結論

本研究では、2004年新潟県中越地震において斜面崩壊が数多く発生した震源近傍の地域を対象として、地震前後の高分解能衛星 IKONOS 画像と DEM を利用して、斜面崩壊地を簡便に検出する方法を提案し、その適用性について検討した。斜面崩壊地の多くは、地震前に存在した樹木などの植生が地震により斜面下方へ流出することから、植生の活性度を表す指標 NDVI を利用し、地震後に NDVI が顕著に減少した地域を斜面崩壊地として検出することを試みた。

解析の事前準備として、DEM を利用した画像のオルソ幾何補正を施し、非変化地域における地震前後の NDVI の比較から、画像の撮影時期の違いによる季節変化を補正した。地震前後の NDVI 差分を算出し、実際の斜面崩壊地の分布との比較から、斜面崩壊地を表す差分値の閾値を検討した。また、誤検出の軽減のため、DEM から算出される傾斜度を利用し、傾斜が 10 度未満の平地を解析対象から除去した。閾値処理により検出されたピクセル分布を 20m メッシュにより評価し、斜面崩壊地の分布を推定した。

推定された崩壊地分布を航空写真の目視判読結果と比較したところ、本手法により全体の 85% 程度の斜面崩壊地を検出できることがわかった。影に隠れた崩壊地や植生変化が小さい崩壊地については検出が困難であった。また、斜面崩壊との違いを判別しがたい変化地域などを誤検出するケースがみられたものの、検出された領域が崩壊地であるか否かを表す正解率は約 90% で、精度よく崩壊地を検出できることを示した。

一般に、表層崩壊などの斜面崩壊では植生が剥落するケースが多くみられることから、本手法は他地域での斜面崩壊事例に対しても適用可能と考えられる。ただし、今回使用したメッシュサイズや閾値などは新潟県中越地震の事例に基づくものであることから、他地域への適用の際には今後検討する余地も残されている。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「都市地震工学の展開と体系化」（代表者：大町達夫・東京工業大学教授）によっている。関係各位に記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 松岡昌志: 高分解能衛星による災害監視の可能性, 予防時報, No.217, 2004, pp.8-13.
- 2) 例えば, 力丸 厚: 新潟県中越地震における写真測量・リモートセンシング分野の取り組み, 写真測量とリモートセンシング, Vol.44, No.1, 2005, p.44.
- 3) 国際災害チャータ: International Charter “Space and Major Disaster”, <http://www.disasterscharter.org/>, (last updated December 2006).
- 4) 向山 栄: IKONOS 衛星画像を利用した地震発生直後における総覧的災害情報の取得, 写真測量とリモートセンシング, Vol.44, No.1, 2005, pp.55-57.
- 5) Singh, A.: Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.10, No.6, 1989, pp.989-1003.
- 6) Lu, D., P. Mausel, E. Brondizio, and E.F. Moran: Change Detection Techniques, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.25, No.12, 2004, pp.2365-2407.
- 7) Nagarajan, R., A. Mukherjee, A. Roy and M. V. Khire: Temporal Remote Sensing Data and GIS Application in Landslide Hazard Zonation of Part of Western Ghat, India, *International Journal of Remote Sensing*, Vo.19,

No.4, 1998, pp.573-585.

- 8) Kimura, H. and Y. Yamaguchi: Detection of Landslide Areas Using Satellite Radar Interferometry, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol.66, 2000, pp.337-343.
- 9) Saraf, A. K.: IRS-1C-PAN Depicts Chamoli Earthquake Induced Landslides in Garhwal Himalayas, India, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.21, No.12, 2000, pp.2345-2352.
- 10) Yamaguchi, Y., S. Tanaka, T. Odajima, T. Kamai and T. Tsuchida: Detection of a Landslide Movement as Geometric Misregistration in Image Matching of SPOT HRV Data of Two Different Dates, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.24, No.18, 2003, pp.3523-3534.
- 11) Nichol, J. and M. S. Wong: Satellite Remote Sensing for Detailed Landslide Inventories Using Change Detection and Image Fusion, *International Journal of Remote Sensing*, Vol.26, No.9, 2005, pp.1913-1926.
- 12) 松岡昌志, 大倉 博, 山崎文雄: 人工衛星 SAR データによる新潟県中越地震での被害地域の検出, 日本建築学会学術講演梗概集 (関西), B-2, 2005, pp.567-568.
- 13) 三浦弘之, 翠川三郎: 高分解能衛星画像による 2004 年新潟県中越地震での斜面災害地域の抽出, 日本建築学会学術講演梗概集 (関東), B-2, 2006, pp.421-422.
- 14) 三浦弘之, 翠川三郎: 高分解能衛星画像にみられる 2004 年新潟県中越地震での斜面災害発生箇所の特徴, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, 2006, pp.1514-1517.
- 15) Tucker, C. J.: Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, *Remote Sensing and Environment*, Vol.8, 1979, pp.127-150.
- 16) 高木幹雄, 下田陽久: 新編 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 2004, 1991p.
- 17) 三浦弘之, 翠川三郎: 建物 GIS データの更新を目的とした高分解能衛星画像からの建物の自動検出手法, 地域安全学会論文集, No.5, 2003, pp.37-44.
- 18) 例えば, 神谷 泉, 田中耕平, 長谷川裕之, 黒木貴一, 早田靖博, 小田切聡子, 政春尋志: 傾斜量図の作成とその応用, 情報地質, Vol.10, No.2, 1999, pp.76-79.
- 19) 中村浩之, 土屋 智, 井上公夫, 石川芳治(編): 地震砂防, 古今書院, 2000, 190p.
- 20) 国土地理院: 平成 16 年新潟県中越地震 1:25,000 災害状況図「山古志」(地形分類及び災害情報), 2006.
- 21) 井口 隆, 大八木規夫, 宮城豊彦, 内山庄一郎: 地すべり災害予測のための地すべり地形分布図の意義, 月刊地球, 号外 No.53, 2006, pp.193-200.

(受理 : 2007 年 2 月 19 日)

(掲載決定 : 2007 年 5 月 28 日)

Detection of Slope Failure Areas due to the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake Using High-Resolution Satellite Images and Digital Elevation Model

MIURA Hiroyuki ¹⁾ and MIDORIKAWA Saburoh ²⁾

1) Post-Doctoral Research Fellow, Center for Urban Earthquake Engineering,
Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

2) Professor, Department of Built Environment, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

ABSTRACT

A methodology for detecting slope failure areas from high-resolution satellite images and digital elevation model (DEM) is introduced and the applicability of the method is examined. The pre- and post-earthquake IKONOS images and the DEM observed in the epicentral area of the 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake (M_J6.8) are used. Slope failures are visually observed in the image since vegetations are flowed away and soils are exposed on the surface in most of slope failure areas. Difference of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) between the pre- and post-earthquake IKONOS images is used to evaluate slope failures. The areas where NDVI is remarkably decreased are extracted as slope failure areas. DEM is used to overlay the images precisely and to reduce mis-detection on flat areas. The distribution of the detected areas shows good agreement with the slope failure areas manually detected from the aerial photographs. Almost 85% of the slope failure areas are correctly detected in the analysis.

Keywords: The 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake, High-Resolution Satellite Image, Digital Elevation Model, Slope Failure, Vegetation Index