

平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震による斜面崩壊の地形的特徴の GIS 解析 GIS Analysis on Geomorphological Features of Slope Failures Triggered by the Noto Hanto Earthquake in 2007

地理地殻活動研究センター 佐藤 浩・宇根 寛・小沢慎三郎

Geography and Crustal Dynamics Research Center

Hiroshi P. SATO, Hiroshi UNE, Shinzaburo OZAWA

測地観測センター 宮原伐折羅

Geodetic Observation Center Basara MIYAHARA

要 旨

平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震の後、国土地理院が作成した災害状況図に示された 65 ヶ所の斜面崩壊の地形的特徴を把握するために、50m メッシュ数値地形モデル (Digital Elevation Model: DEM) から計算された傾斜、曲率、斜面方位と重ね合わせ、地理情報システム (GIS) を用いて斜面崩壊の単位面積あたりの頻度をそれぞれ調べた。その結果、高頻度なのは 30–35° の傾斜帯と 2.8–3.0 の曲率であり、これらの頻度は、より急斜面または凸斜面で生じた傾向のあることを示唆している。

崩壊の斜面方位については、猿山岬を境に、北海岸では南向き方位と西向き成分を持つ方位に、西海岸では南～南西～西向き方位に偏っている (斜面崩壊の異方性) ことが判った。2つの電子基準点「輪島」「富来」の地震直後の地表変位の向き (変位速度 0.1m/sec 以上) を調べたところ、北海岸の「輪島」では北向き、西海岸の「富来」では南東向き、西向き、北向きであった。両者が完全に一致したわけでは無いが、地表変位の向きが斜面崩壊の異方性に寄与していることが示唆された。さらに、65 ヶ所の斜面崩壊を、防災科学技術研究所の地すべり地形分布データベースと重ね合わせた。その結果、既往地すべり地においてよりも、その他の山地斜面において生じた斜面崩壊の数のほうが 3 倍以上多かったことが判った。

1. はじめに

平成 19 年 3 月 25 日午前 9 時 42 分 (日本時間)、能登半島沖の北緯 37° 13.2′, 東経 136° 41.1′, 深さ約 11km を震源とする平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震 (M6.9, 最大震度 6 強) が発生した (気象庁, 2007a; 気象庁, 2007b)。

国土地理院は、地震後直ちに (平成 19 年 3 月 26 日)、震源域周辺の日本海に面する能登半島の志賀町から輪島市、すなわち西海岸～北海岸を中心に縮尺 1/10,000 のカラー空中写真を撮影し (日谷ほか, 2007)、その写真を判読して地震によって生じたと考えられる斜面崩壊をマッピングするとともに、その成果を 3 月 30 日に

災害状況図 (電子国土) として公開した (関口ほか, 2007)。

ここでは、その空中写真の撮影範囲のほぼ全域、284.8km² を対象地区とし、その中で発生した 65 ヶ所の斜面崩壊について、国土地理院の 50m メッシュ数値地形モデル (Digital Elevation Model: DEM) を用いた地形的特徴と、地すべり地形分布図データベース (防災科学技術研究所, 2007) を重ね合わせ、地理情報システム (GIS) を用いて調べた結果を述べる。

2. 対象地区の地質

猿山岬 (図-1; 経済企画庁, 1974) を境とし、対象地区を北海岸と西海岸に二分類して、地質の概要を述べる (国土地理院, 1997)。

図-1 において、北海岸では中新統中部の堆積岩 (砂岩、泥岩、礫岩) と中新統上部の泥岩が大部分を占め、一部を占めるのが中新統火砕岩 (流紋岩質および石英安山岩質の凝灰岩) と能登半島に広大な分布を示す中

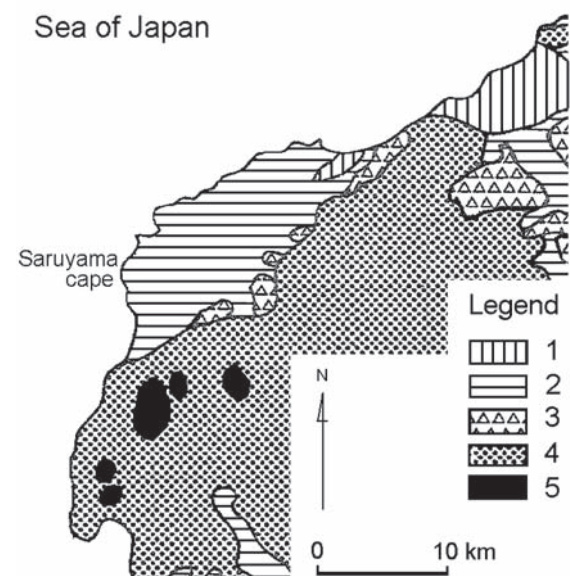


図-1 対象地区の地質概要図。1. 中新統上部, 2. 中新統中部 (堆積岩), 3. 中新統 (火砕岩), 4. 中新統下部 (火砕岩), 5. 先第三系 (花こう岩, 片麻岩)

新統下部火砕岩（主体は安山岩溶岩，火山角礫岩，凝灰角礫岩）である。また，北海岸では，中新統中部の堆積岩と中新統上部の泥岩を中心に既往の地すべりが多い。西海岸では，中新統中部堆積岩と中新統下部火砕岩が大部分を占め，ジュラ紀花こう岩と飛騨変成帯に属する片麻岩が一部を占める。

3. 斜面崩壊分布とDEMの重ね合わせ

図-2に黒点で示したのは，今回撮影の空中写真を利用して国土地理院が判読した輪島市周辺の斜面崩壊である。空中写真で判読する限りでは，小規模な表層崩壊が多い。黒細線で囲んだ撮影範囲の南東側にある2ヶ所（図-2で1，2と番号をつけた箇所）の斜面崩壊は，ALOS/AVNIR-2画像による判読結果（塩見・北原，2007）によってその位置を補った。「1」と番号をつけたのが，一時的に河道閉塞を来した斜面崩壊である。図-2にマッピングした斜面崩壊の数65ヶ所と

は，これらの2ヶ所も含めている。

本研究では，図-2にマッピングした斜面崩壊を，国土地理院の50mメッシュDEMと重ね合わせて，65ヶ所の斜面崩壊の地形的特徴を定量的に把握した。具体的には，50mメッシュDEMから計算される傾斜，曲率（斜面における傾斜変化率，正・負の値が大きいほど，それぞれ斜面の凸・凹の曲率が高くなり，ゼロは等斉斜面），斜面方位の3つの地形量に着目した。

図-2にマッピングした斜面崩壊は，崩壊源，流送域，崩壊土の堆積域を一括してその外縁を個々に囲んだポリゴンデータである。その面積が50m×50mの中に収まる程度の小規模な崩壊がほとんどであるため，個々の斜面崩壊がその1メッシュすべてを占めると仮定して，斜面崩壊の中心部に相当するメッシュの傾斜，曲率，斜面方位を抽出した。さらに，既存の地すべりと斜面崩壊の関連を調べた。

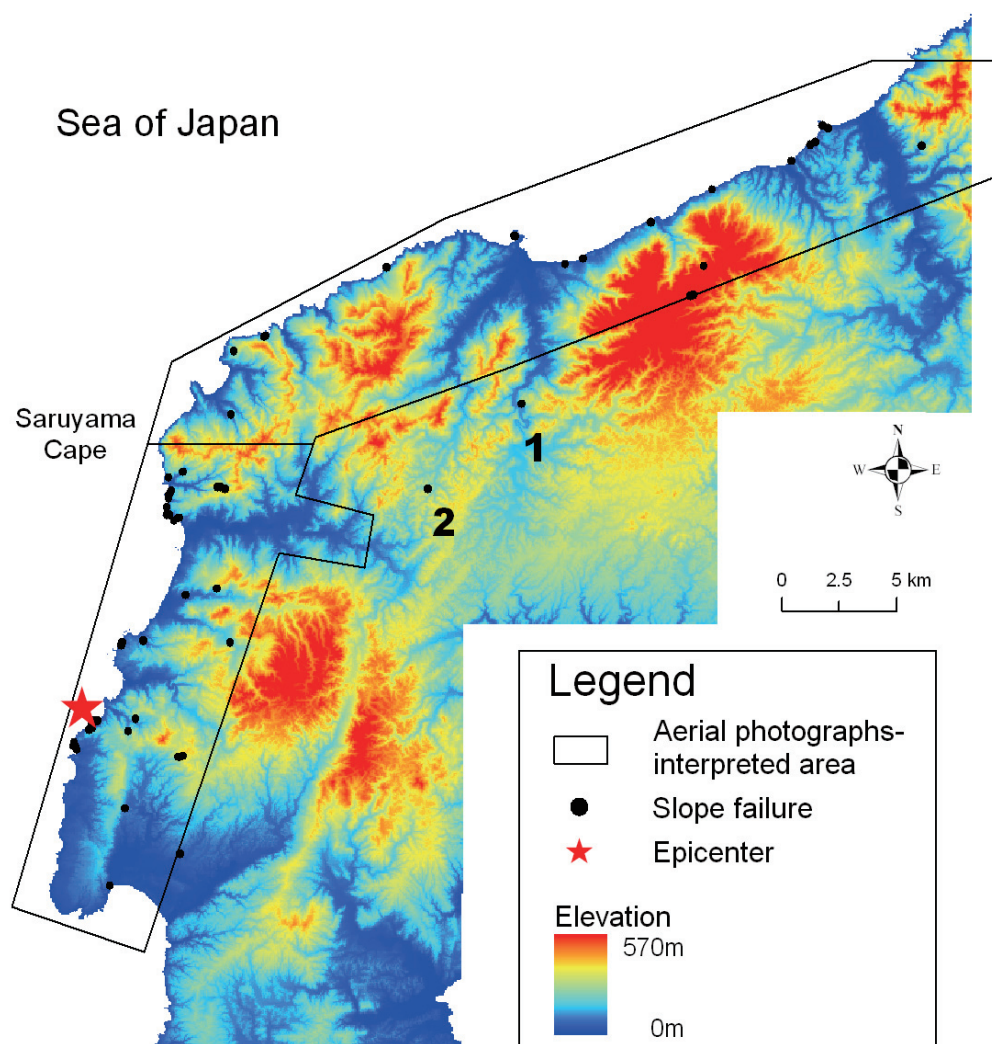


図-2 対象範囲における斜面崩壊（黒点）の分布。赤星は震央。解析に応じて，対象範囲を北海岸と西海岸に二分類した。背景は国土地理院50mメッシュ標高データ。

4. 結果

4. 1 斜面崩壊と傾斜の関係

図-3 (a) に示したのは、対象範囲の全域における、斜面崩壊と傾斜の関係である。最も斜面崩壊の頻度が高いのは $15-20^{\circ}$ の傾斜帯における 21 ヶ所であった。図-3 (a) については、 $15-20^{\circ}$ の傾斜帯が今回の判読範囲の面積を広く占めるので、たまたま斜面崩壊が生じる機会が多かったのかもしれない。そこで、今回の判読範囲において各傾斜帯が占めるメッシュ（1 メッシュ＝約 2500 m^2 ）数で各傾斜帯の斜面崩壊数を割り、単位面積（＝1 メッシュ）あたりの崩壊個数により平準化した頻度を求めた。その結果が図-3 (b) である。ただし、縦軸は 10,000 倍にスケールアップしているため、スケールアップした後の数値を述べる（以下、同様）。 30° 未満までは $15-20^{\circ}$ の頻度が 11.8 と最も多いが、全体的に見ると、 $30-35^{\circ}$ における斜面崩壊の頻度が 19.1 と著しく高く、地震によって、急斜面で斜面崩壊が生じやすかったことが示唆された。

4. 2 斜面崩壊と曲率の関係

図-4 (a) に示したのは、対象範囲の全域におけ

る、斜面崩壊と曲率の関係である。図-4 (a) において、曲率 -1.4 以上 1.4 未満の各曲率帯の崩壊頻度を見ると、0 を中心として負に偏って多い。つまり、見かけ上、凸よりも凹の斜面で斜面崩壊が多い。

平準化のため、傾斜 5° 以上の全斜面について、各曲率帯が占めるメッシュ数でその曲率帯の崩壊個数を割り、単位面積（＝1 メッシュ）あたりの頻度を求めた（図-4 (b)）。縦軸のスケールは 10,000 倍してあり、以下その値で述べる。曲率の絶対値が 2.6 を超えると単位面積頻度は極端に大きく、曲率帯 2.8 以上 3.0 未満で最大値 162.6 であった。個数が少ないため断定できないが、曲率帯 $1.8-2.0$ の頻度 30.8 と $-2.0-1.8$ の頻度 10.8 も考えると、地震による崩壊は凹よりも凸斜面で多いという従来の知見（例えば中村, 2000）の裏付けを示唆している。次いで曲率帯 $-3.2-3.0$ の頻度は 131.6 である。岩橋ほか（2006）は、2004 年新潟県中越地震による十分な崩壊個数に基づき、凹凸を問わず曲率の大きいほど崩壊の単位面積頻度が高いことを示したが、今回の崩壊個数は中越地震と比較してかなり少ないため、これがその指摘を裏付けたものなのか、今回は明確にできない。

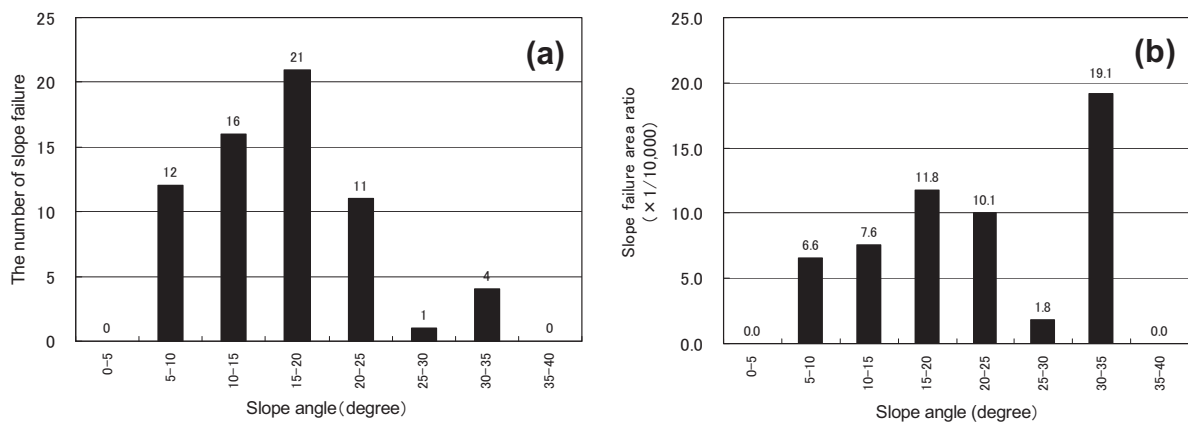


図-3 (a) 斜面崩壊の傾斜に関する頻度、(b) 各傾斜帯 1 メッシュあたりの斜面崩壊頻度。

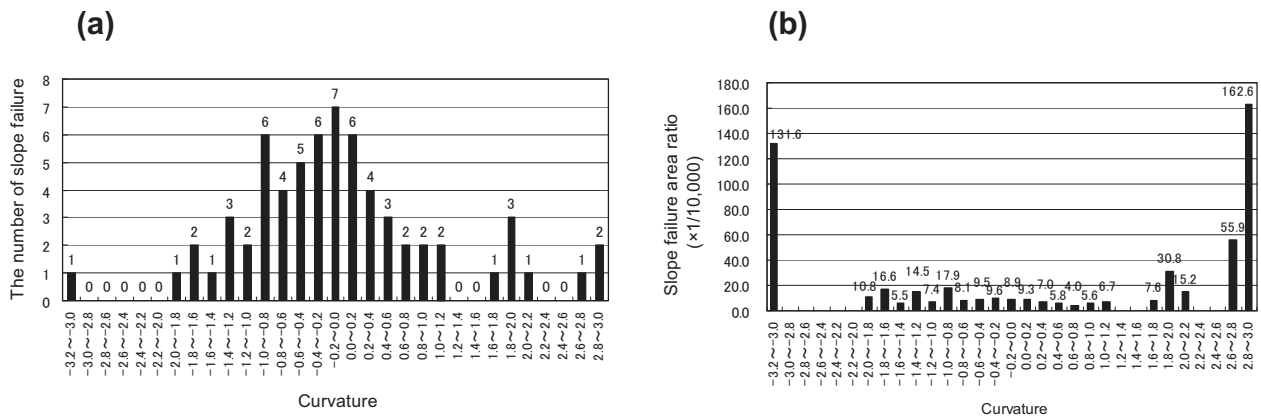


図-4 (a) 斜面崩壊の曲率に関する頻度、(b) 各曲率帯 1 メッシュあたりの斜面崩壊頻度。

4. 3 斜面崩壊と斜面方位の関係

斜面崩壊と斜面方位の関係について、65ヶ所の斜面崩壊は、北海岸では21ヶ所、西海岸では44ヶ所に分けられる。図-2において、「1」と番号を付した斜面崩壊は北海岸に、「2」については西海岸にそれぞれ繰り入れた。

4. 3. 1 北海岸

サンプル数は少ないが、図-5 (a) は、21ヶ所の斜面崩壊の斜面方位分布を調べたレーダーチャートである。北西向き斜面で6ヶ所、南向き斜面で4ヶ所とサンプル数の半数近くを占めているが、東向き成分を有する北東向き、東向き、南東向きの方位を合わせると2ヶ所しか無く、北西または南向きの方位の頻度が高いことが判った。

平準化のため、傾斜 5° 以上の全斜面について、各斜面方位が占めるメッシュ数で各斜面方位の崩壊個数を割り、単位面積(=1メッシュ)あたりの頻度を求めた。その結果が図-5 (b) のレーダーチャートである。このグラフの数値は、10,000倍にスケールングして表示されている。このレーダーチャートによると、南～南西～西～北西向き斜面に崩壊が偏っていることが判った。そして、南向き斜面は北向き斜面よりも崩壊の頻度は2倍以上高いことが明らかになった。

4. 3. 2 西海岸

図-6 (a) は、44ヶ所の斜面崩壊の斜面方位分布を調べたレーダーチャートである。南向き斜面で12ヶ所、西向き斜面で10ヶ所、南西向き斜面で9ヶ所と、南～西向きの頻度が高い。

北海岸の場合と同様に平準化した頻度を示したのが図-6 (b) のレーダーチャートである。これによっても南～西向きの異方性は変わらない。以上のことから、崩壊斜面の方位については、北海岸では南向きと西向き成分を持つ方位の異方性が、西海岸では南～南西～西向き斜面の異方性が認められることが判った。

4. 3. 3 一般斜面の斜面方位と傾斜の関係

一般的に、傾斜が急であれば斜面崩壊は生じやすいが、斜面崩壊に異方性が生じる可能性として、対象範囲では特定の向きで斜面が急であることが疑われる。そこで、北海岸と西海岸それぞれについて、傾斜 5° 以上の一般斜面を対象とし、各斜面方位の平均傾斜を求めた。

図-7 (a) に示した北海岸一般斜面の平均傾斜は、どの方位もほぼ 17° 程度で違いは無い。そして、南から西向き成分を有する斜面が、ことさら急であるというわけでは無い。図-7 (b) に示した西海岸一般斜面の平均傾斜は、東～南向きの斜面が比較的急であるが、斜面崩壊が多数発生した方位(西～南向き)とは必ずしも一致しない。

このように、斜面崩壊の異方性は、一般斜面の斜面方位と傾斜の関係で説明するのは困難であることが判った。なお、全体的に、西海岸一般斜面の平均傾斜は、北海岸よりも緩い。傾斜の標準偏差に着目すると、北海岸、西海岸ともに同様であり、また、どの斜面方位についても変わりはない。つまり、傾斜のばらつきは北海岸と西海岸の違い、あるいは斜面方位に依存しない。

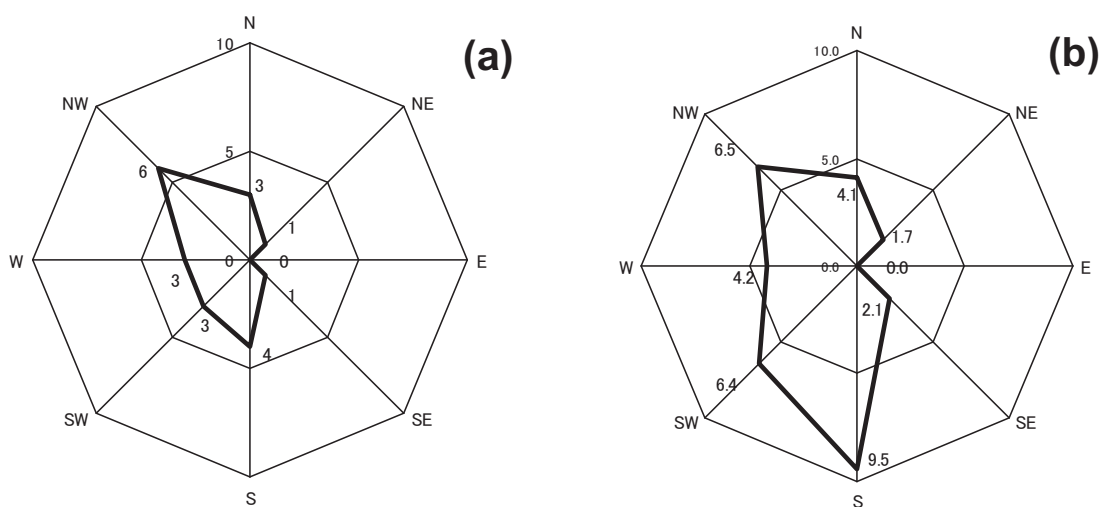
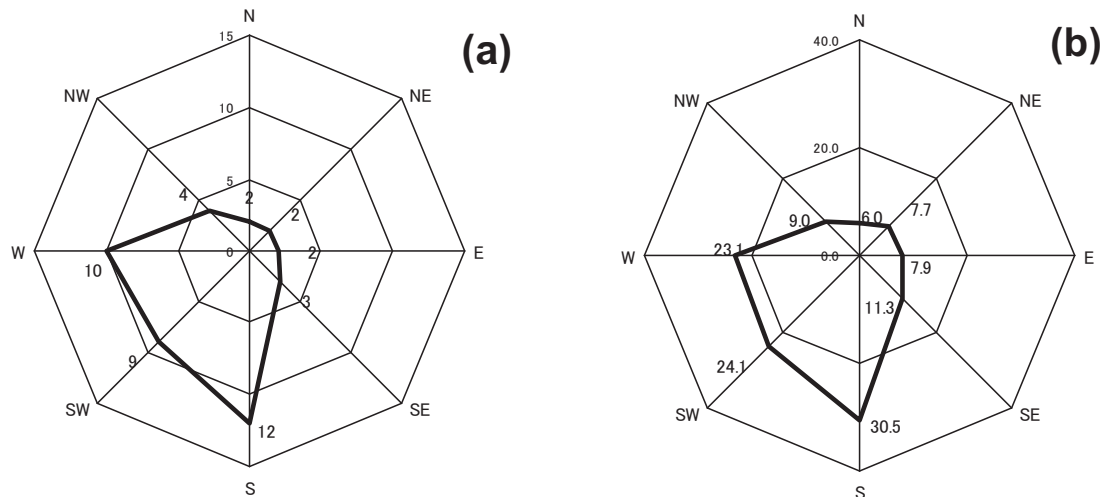
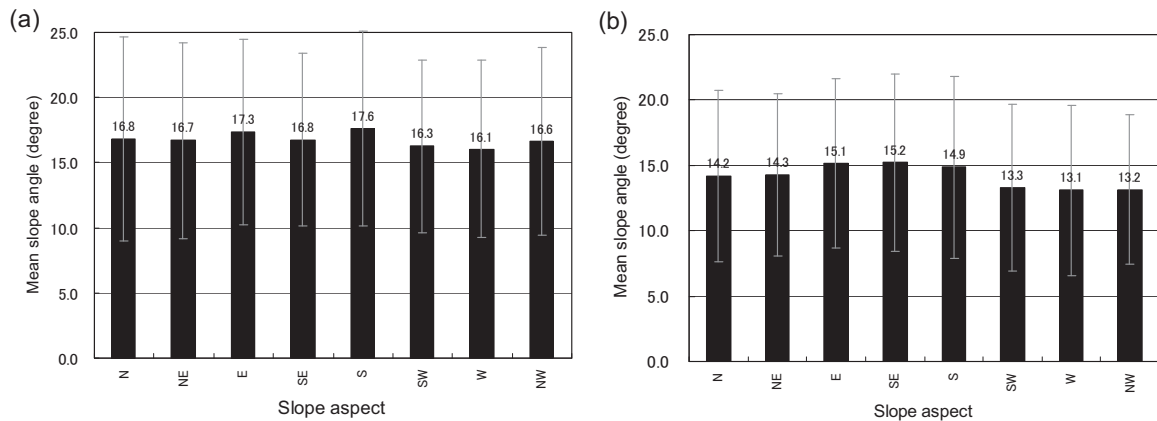


図-5 北海岸における斜面崩壊と斜面方位の関係。(a) 斜面崩壊の斜面方位に関する頻度、(b) 各斜面方位に占める斜面崩壊の比(×1/10,000)



図－6 西海岸における斜面崩壊と斜面方位の関係。(a) 斜面崩壊の斜面方位に関する頻度, (b) 各斜面方位に占める斜面崩壊の比 ($\times 1/10,000$)



図－7 斜面方位ごとの平均傾斜。エラーバーは標準偏差。(a) は北海岸, (b) は西海岸。

4. 4 斜面崩壊分布と地すべり地形分布図データベースの重ね合わせ

図－8には、図－2に示した 65 ヶ所の斜面崩壊を、地すべり地形分布図データベース（防災科学技術研究所, 2007）と重ね合わせた結果を示す。その結果、表－1に示すように、既往地すべり地形で発生した斜面崩壊よりも、一般斜面で生じた斜面崩壊のほうが3倍以上多いことが判った。

表－1 斜面崩壊と既往地すべり地形の関係

斜面崩壊の位置 (Position of the slope failures)	箇所数 (Site number)
地すべり移動体上 (on the landslide mass)	15
地すべり滑落崖 (on the landslide scar)	1
その他山地斜面 (on the other mountain slopes)	49

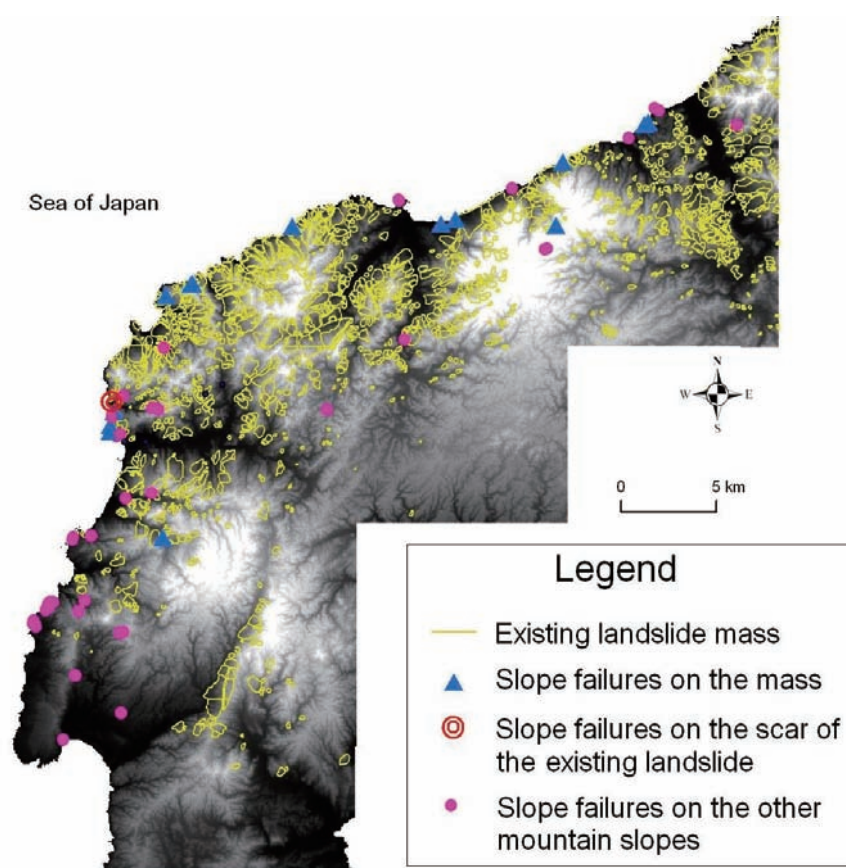
ただし、空中写真ではその地表変状が判読できない、わずかな動きをともなった地すべりが今回の地震によって生じた可能性のあることが指摘されている（宇根ほか, 2007）。

5 考察

5. 1 地殻変動と斜面崩壊の関係

斜面の剪断強度を上回る応力が地震動の加速度によって与えられ、斜面崩壊が発生することはこれまで多くの研究例があり（例えば Chigira, 1982）、起震断層の近傍では、地震による地表変位そのものが斜面崩壊を引き起こす可能性が示唆されている（宇根ほか, 2006）。

そこで、ここでは斜面崩壊の異方性に注目し、国土地理院の電子基準点の観測網（GPS earth observation network system, GEONET）のデータから、今回の地震による地表変位の向きを調べた。



図ー8 斜面崩壊と地すべり地形分布図データベース（防災科学技術研究所，2007）の重ね合わせ。斜面崩壊の位置を既往地すべり地形に応じて3つに分類（青三角：地すべり移動体上で生じた斜面崩壊；赤二重丸：滑落崖上で生じた斜面崩壊；桃色の点：その他の山地斜面で生じた斜面崩壊）した。

5. 2 電子基準点1秒間隔データ

GEONETのうち、本研究で取り上げたのは電子基準点「富来」と「輪島」の1秒間隔のデータである。「富来」は、断層モデル（小沢ほか，2007）の矩形断面上端から平面距離で最も近い位置（11.5km）に位置するとともに、断層の上盤に当たり、地表変位の影響を最も強く受けた電子基準点であると考えることができる。「輪島」は、断層モデルの矩形断面上端の北東端からさらに北東向きに14.8kmに位置している。「輪島」の周辺では、海食崖における斜面崩壊が多発している。図ー9に、斜面崩壊65ヶ所の斜面方位と2つの電子基準点の位置を示す。

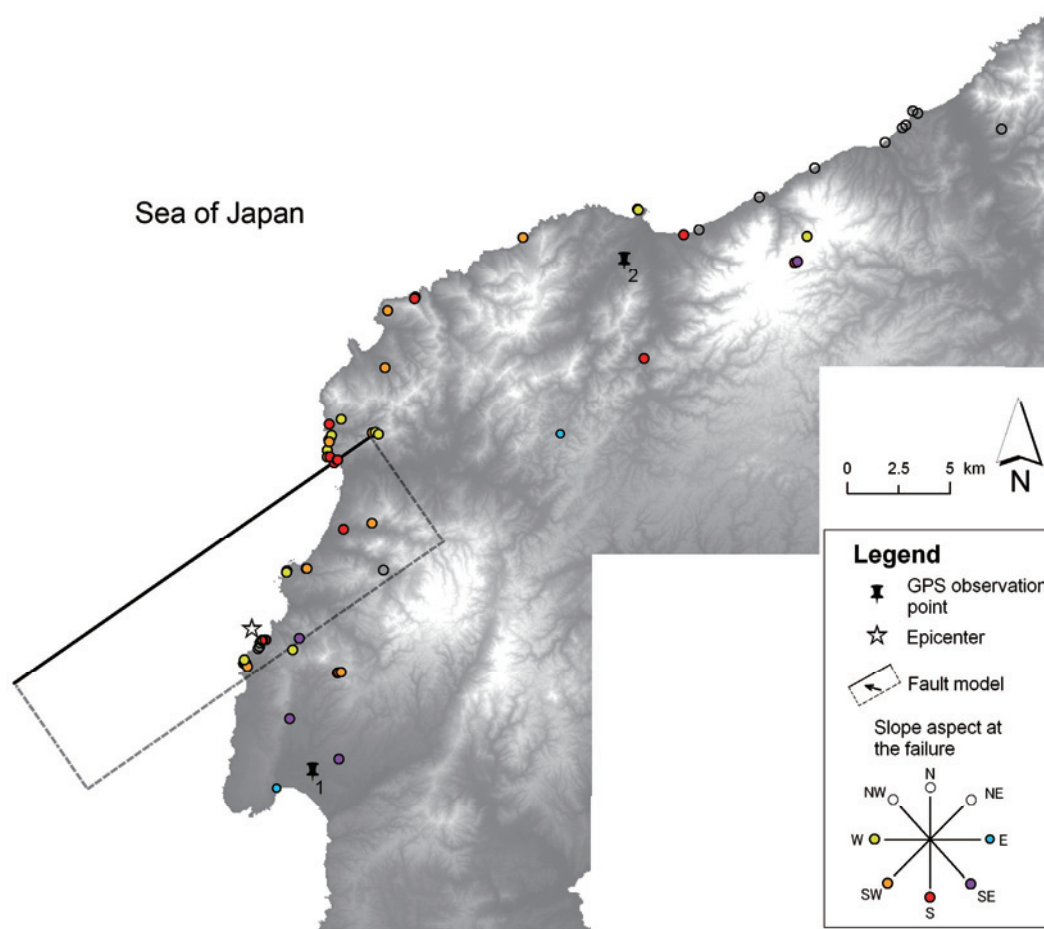
震源から南に68km離れた電子基準点「福光」（富山県南砺市）を固定点として、これら2点の地表変位を解析した。図ー10に示したのは、「1.」が富来、「2.」が輪島の電子基準点の1秒間隔の地表変位であり、それぞれ地震前の5秒間の位置を併記してある。矢印で示した点より後の電子基準点の測位データは停電により失われてしまっている。

図ー10の「富来」の地表変位は、地震後1秒ごとに、

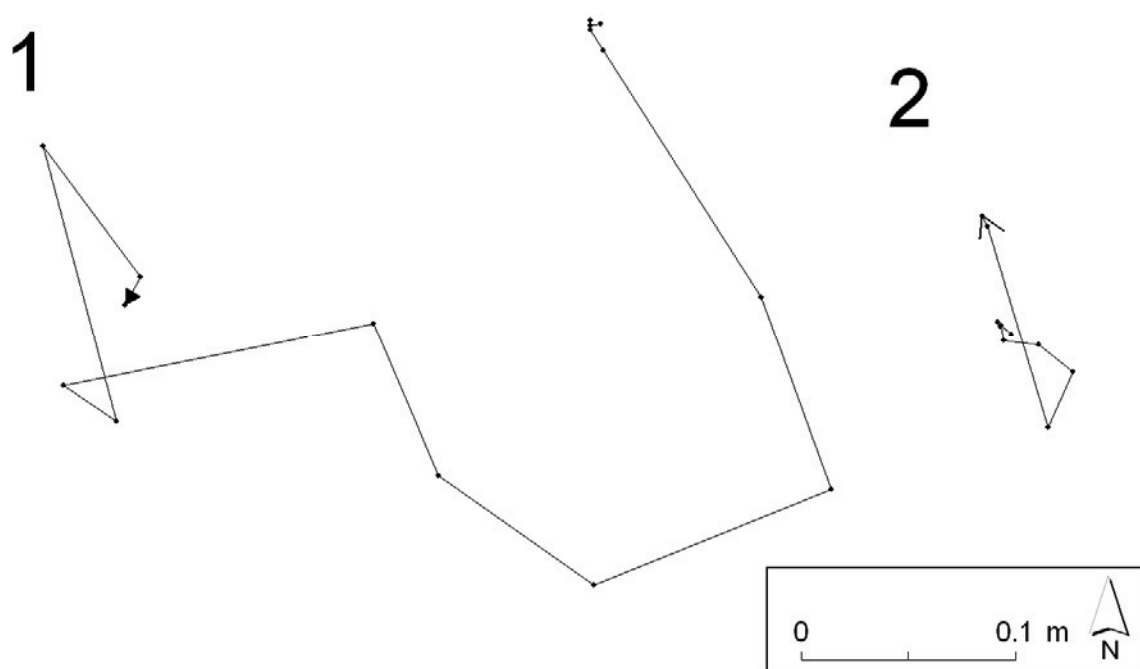
南東向き→南向き→西向き→北西向き→北西向き→西向き→南東向き→北向き→南東向き→南西向き（データ終了）、北海岸の「輪島」の地表変位は、東向き→南東向き→南西向き→北向き→北西向き（データ終了）に変位している。

図ー10の地表変位の推移は、地表変位の速度も表している。「輪島」では、北向きの変位速度が、0.1m/sec以上を示している。完全には一致しないが、この北向きの変位が、図ー5（b）で、斜面崩壊が北西向きの異方性に影響を与えた要因の一つと考えることができる。

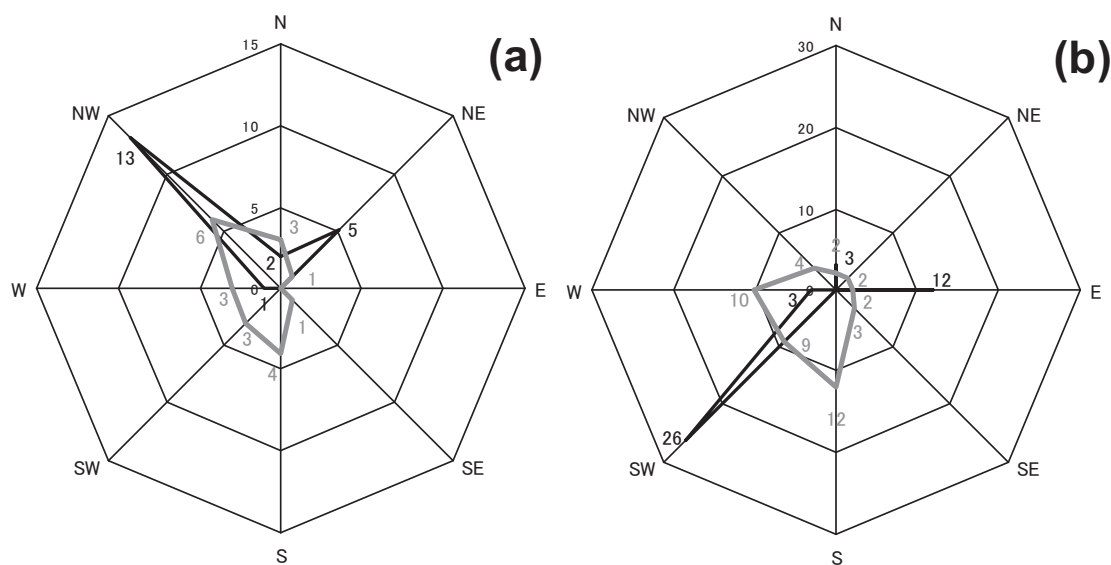
西海岸に位置する「富来」については、速度0.1m/sec以上を示した変位は、地震直後の南東向きと、それに続く西向き、北向きである。このうち、西向きと南東向きの地表変位が、西海岸での斜面崩壊の発生に寄与したと考えることができる。なぜ、北向きの地表変位が崩壊の斜面方位に影響しなかったのか不明である。



図－9 65ヶ所の斜面崩壊と斜面方位と対象とした電子基準点「富来」「輪島」の位置（それぞれ番号1，2）．併記した断層モデル（小沢ほか，2007）は，陸側が上盤，海側が下盤の逆断層を示す．



図－10 2つの電子基準点の地震前後の1秒間隔の変位．1，富来；2，輪島．



図ー11 崩壊の斜面方位（灰色線）と断層モデルから計算された斜面崩壊箇所における地表変位の方向（黒線）。
断層モデルは小沢ほか（2007）による。（a）北海岸（21ヶ所），（b）西海岸（44ヶ所）

5. 3 断層モデルから得られる推定地表変位と崩壊の斜面方位の重ね合わせ

電子基準点による1秒間隔の地表変位は地震動による時々刻々の変位を捉えたデータであるが、停電により最終的な地表変位の向きは判らないこと、たとえ停電によるデータの欠落が無かったとしても、斜面崩壊が生じた場所と同じ場所で、最終的にどのように地表が動いたのか知るのには難しい。

図ー11のレーダーチャートの黒線は、小沢ほか（2007）による断層モデルから計算で得られる3次元推定地表変位に基づき、65ヶ所の斜面崩壊箇所における推定地表変位（平面）を求めて8方位に分類し、北海岸（a）と西海岸（b）に分けてプロットしたものである。

図ー11（a）を見ると、西海岸よりも北海岸のほうで明瞭だった北西向きの斜面崩壊異方性が、推定地表変位でも示されている。

図ー11（b）を見ると、北海岸よりも西海岸のほうで明瞭だった南西向きの異方性も、推定地表変位と一致している。ところが、北海岸よりも西海岸のほうで明瞭だった南向きと西向きの斜面崩壊異方性は、推定地表変位には見られず、逆に、東向きの推定地表変位異方性が、斜面崩壊には見られない。このことから、斜面崩壊の異方性は、地震による最終的な地表変位に応じて生じた斜面崩壊と、その最終地表変位に至るまでの時々刻々の地表変位に応じて生じた斜面崩壊の、

それぞれの斜面方位をミックスして現れるものであり、言い換えれば、斜面崩壊の異方性は、震源過程の反映である地盤の挙動（例えば最初は縦ズレ成分、次に、横ズレ成分といった時々刻々の断層運動に応じた地表変位）の重畳表示と考えられる。

6. おわりに

傾斜、曲率、斜面方位、既往地すべりとの関係に着目し、GISを用いて能登半島地震が引き起こした斜面崩壊の特徴を調べた。

対象とした斜面崩壊65ヶ所については、サンプル数が十分とはいえないが、急傾斜で曲率が凸の斜面が多く、従来からの知見を踏襲した。また、既往地すべり地形で発生した斜面崩壊よりも、一般斜面で生じた斜面崩壊のほうが3倍以上多かったことが判った。さらに、斜面崩壊の方位に南～南西の異方性のあることを見出し、一般斜面における急傾斜がこの向きに集中しているのではないことを確認した。その上で、電子基準点による1秒間隔の地表変位や、断層モデルから計算される平面の推定地表変位と突き合わせた。地表変位の向きと斜面崩壊の異方性が完全に一致することは無かったが、これまで地震動の入射の方向性や加速度、斜面方位に応じた岩石の風化といった要因で説明されがちなこの異方性を、地表変位の向きという別の観点から説明しようとする議論を行った。

参考文献

岩橋純子, 佐藤 浩, 山岸宏光 (2006) : 新潟県中越地震による小崩壊の分布特性 ー平成16年新潟県中越地震1:25,000災害状況図のデータを中心にー, 国土地理院時報, 110, 81-89.

- 宇根 寛, 佐藤 浩, 飛田幹男 (2006) : 2005 年パキスタン北部地震による斜面崩壊の方位と地表変位の関係について, 日本地理学会発表要旨集, 70, 38.
- 宇根 寛, 佐藤 浩, 矢来博司 (2007) : 衛星合成開口レーダー画像で抽出された平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震に伴う地形変化, 国土地理院時報, 113, 41-47.
- 関口辰夫, 木佐貫順一, 野口高弘, 佐藤宗一郎, 太田正孝 (2007) : 平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震に関する地理調査部の取り組み, 国土地理院時報, 113, 17-26.
- 小沢慎三郎, 矢来博司, 飛田幹男, 宇根 寛, 西村卓也 (2007) : 平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震の震源断層モデル, 国土地理院時報, 113, 49-53.
- 気象庁 (2007a) : 地震の詳細資料, http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2007_03_25_noto/data.html (accessed 3 Oct 2007)
- 気象庁 (2007b) : 緊急地震速報の内容, <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/EEW/kaisetsu/200608/200703250942.pdf> (accessed 3 Oct 2007)
- 塩見和弘, 北原敏夫 (2007) : ALOS (AVNIR-2) 画像を利用した差分抽出による災害状況把握に関する調査—平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震の場合—, 国土地理院時報, 113, 27-32.
- 経済企画庁 (1974) : 1:200,000 土地分類図 17 (石川県).
- 国土地理院 (1997) : 1:100,000 地殻変動土地条件図能登半島, 国土地理院技術資料 D・1-No. 347.
- 中村浩之 (2000) : 地震による崩壊発生, 『地震砂防』 14-27.
- 防災科学技術研究所 (2007) : 地すべり地形分布データベース, http://lsweb1.ess.bosai.go.jp/jisuberi/jisuberi_mini/index.asp (accessed 3 Oct 2007)
- 日谷仁英, 三浦一彦, 田崎昭男, 中村孝之, 浦部ぼくろう (2007) : 平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震に伴う測図部の災害対応, 国土地理院時報, 113, 13-16.
- Chigira M (1982) : Dry debris flow of pyroclastic fall deposits triggered by the 1978 Izu-Oshima-Kinkai earthquake: the “collapsing” landslide at Nanamawari Mitaka-Iriya, southern Izu Peninsula, Journal of Natural Disaster Science, 4, 1-32.