

□台風 12 号による深層崩壊

— 発生 の 場 と 時 の 予 測 に 向 け て —

京都大学防災研究所 千木良 雅 弘

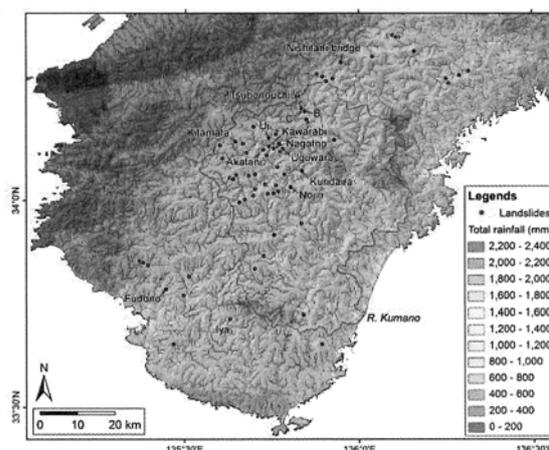
1. はじめに

2011 年台風 12 号は、9 月 2 日から 5 日にかけて、四国と中国地方を横断した。そして、台風の進行方向右側にあたる紀伊山地では大量の降雨が生じ、50 を超える数の深層崩壊が発生し、天然ダムが形成され、それらの内 5 か所では残存した天然ダムの決壊が強く懸念された。この台風の結果、奈良県と和歌山県では、土砂災害による死者 47 名、洪水による死者 12 名、その他の死者 22 名を含めて、合計 81 名の犠牲者が生じた。土砂災害による死者は、土砂の直撃を受けたものと、増水した川への土砂の突入による"津波"によるものがあった。

深層崩壊の発生前の状況は、発生後に空中写真などを用いて分析されてきたため、明確になっている場合は少なかった。そのためもあって、その発生場所予測技術は確立していなかったが、台風 12 号による深層崩壊の分析はこの点で大きな進歩をもたらした。それは、事前の航空レーザー計測データが、国土交通省と奈良県によって取得されていたからである。これらのデータを用いた地形解析によって、深層崩壊発生前の地形的特徴が明らかになり、深層崩壊発生場の予測に大きく近づくことができた。また、複数個所の深層崩壊の発生時を特定することができ、それらの崩壊が発生するまでに降った降雨量も求めることができた。ここでは、これらの深層崩壊の特徴について述

べ、また、それらの発生前の地形と地質的特徴をとりまとめ、深層崩壊の発生場と時の予測への見通しに触れる。

2. 地形・地質の概要



図ー 1 深層崩壊の分布と台風12号による累積降雨の分布（松四雄騎原図）。雨量はレーダーアメダス解析雨量による。

紀伊山地は標高 1,915m の八経ヶ岳を最高峰を最高峰とする山地で、その中央部には熊野川と北山川が北から南に向けて流れている。紀伊山地の大部分はこれらの水系の流域となっており、北部を西流する紀ノ川水系の流域は狭く、その流域と熊野川流域および北山川流域との流域界は北部に偏っている。紀伊山地の主体は東西に延びる中央構造線よりも南側の西南日本外帯に位置し、最北

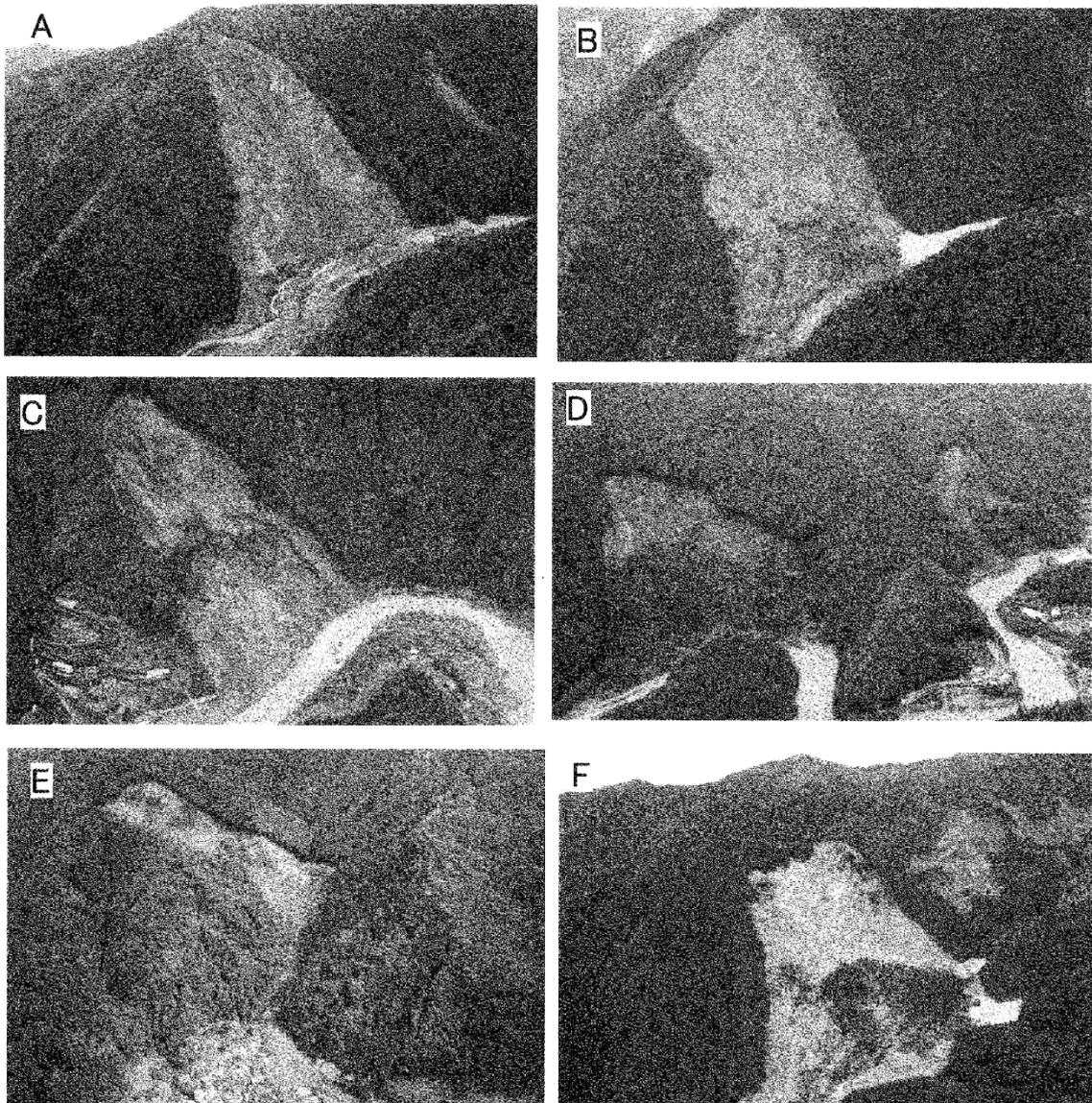


図-2 発生した主要な深層崩壊（2011年9月22日千木良撮影）。A：赤谷、B：長殿、C：清水（宇井）、D：天川坪の内、E：北股、F：熊野（いや）

部に三波川帯と秩父帯が分布し、その南側の広い範囲は白亜紀から古第三紀の地層が分布する四万十帯となっている。今回の災害発生の主要部は四万十帯に位置し、北部の一部の崩壊は秩父帯に位置している。これらの四万十帯と秩父帯とは、関東山地から中部、紀伊山地、四国山地を経て九州山地まで続く地帯であり、同様の地質地形的条件を備えている。

3. 深層崩壊の発生と降雨

台風 12 号によって発生した深層崩壊で最大規模のものは、面積 548,500 m²で体積約 1,400 万 m³の栗平の崩壊、次いで赤谷の崩壊(面積 423,700 m²、体積約 800 万 m³)であった。栗平の崩壊体積は、2009 年台湾小林村の崩壊(2,500 万 m³)の半分強、2005 年の台風 14 号による耳川流域の最大の崩壊(330 万 3m³)の 5 倍程度であった。

8 月 30 日 17 時からの総降水量は、紀伊半島の広い範囲で 1,000 mm を超え、奈良県北山村では降

り始めの8月30日から9月5日までの総雨量が2,439mmを記録した。台風12号による崩壊の特徴は、表層崩壊が極めて少なく、深層崩壊が散点的に発生したことである。このことは、ヘリコプターによる空からの観察でも明らかであった。それらの発生は、メディアの報道や聞き取り調査など様々な資料をもとにすると、9月3日午後6時頃の野尻の崩壊に始まり、4日の夕刻にかけて発生した。深層崩壊は50か所以上で発生し(図-1)、それらの内、5か所(赤谷、長殿、北股、熊野、栗平)では天然ダムが形成・残存し、その決壊が強く懸念され、改定土砂災害防止法に基づいて、国土交通省による緊急調査が実施された。また、十津川村野尻では崩壊土砂が増水した十津川に突入し、河川水の流路を対岸に押し付け、そこにあった家屋が流失し、8名が犠牲となった。十津川村宇宮原では、やはり崩壊土砂が増水した十津川に突入し、おそらく河川を一時的にせき止め、結果的に上流に向かう"津波"を引き起こし、それが突入箇所から1km上流にある長殿発電所を破壊した。五條市宇井地区では、対岸の崩壊土砂に襲われ、11名が犠牲となった。

台風による3日間累積降雨量は、紀伊山地の東側と南側が多かったが(図-1)、深層崩壊の発生はむしろ、紀伊山地の中央部で、累積降雨量は相対的には少ない範囲に集中した。これは、単に累積降雨量が深層崩壊の発生場所を決めたのではなく、地域の"雨慣れ"も反映していることを示唆してい

る。また、これらの深層崩壊の内19の崩壊は、地震記録と聞き取り調査などにより、発生時刻が特定されている。この深層崩壊発生時までの累積雨量をレーダーアメダス解析雨量から求めると、累積雨量がおおむね700mm以上に達したあたりから深層崩壊が発生したことも明らかになった。従来、崩壊発生時刻の特定が難しかったため、崩壊が発生した時までの累積雨量が正確には求められなかったことから、このデータは貴重なものである。

4. 崩壊発生前の微地形

崩壊発生前後の詳細DEMデータが取得されている9つの崩壊について、傾斜図を作成して、崩壊発生前の地形と崩壊の輪郭とを詳細に比較すると、いずれの深層崩壊もその頭部となる部分に小崖あるいは線状の凹地を伴っており、それらが崩壊の輪郭にほぼ沿っていることが明らかとなった(図-3)。これらの小崖や線状凹地は、斜面が重力によって徐々に変形して形成された地形である。つまり、深層崩壊は、何の前兆もないところに発生したのではなく、あらかじめ重力によって変形した斜面で生じたことが明確になった。言い換えれば、これらの地形に注目すれば深層崩壊の発生場所の予測に近づくことができることが初めて明確になった。これらの中には空中写真で比較的容

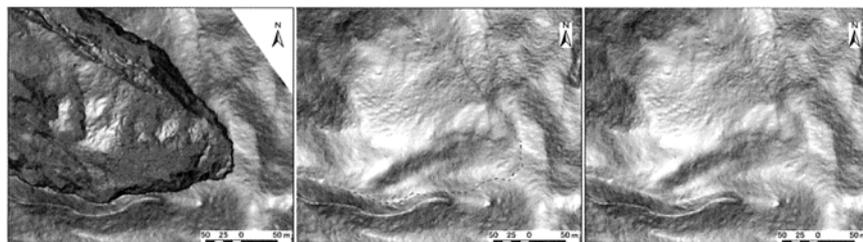


図-3 赤谷の深層崩壊最上部の傾斜図(黒い部分ほど急傾斜)。左から、発生後、発生前(崩壊の輪郭付き)、発生前(輪郭なし)。発生前にすでに崩壊の輪郭に沿って小崖(黒い筋として表現されている)が形成されていることがわかる。

易に重力変形地形として認識できるものもあるが、多くは空中写真ではよほど注意深くしてようやく認識できる程度のものである。つまり、それらの発見には航空レーザー計測による詳細 DEM データ取得が不可欠かつ有効であることもわかった。

上記の小崖は、規模が大きくなれば地すべりの滑落崖と同じとみなせるが、今回の深層崩壊に先だったものは、いずれも小規模であった。崩壊発生前後の地形を比較し、崩壊に先だった変形量と斜面全体の大きさとの比、つまり一種の"ひずみ"を求めたところ、5～21%であった。この"ひずみ"の量については、今後の検討を待つところであるが、斜面が重力によって変形し、崩壊の直前の"限界ひずみ"状態にあった斜面が崩壊したものと理解できる。

5. 地質構造

前述したように、いずれの深層崩壊も重力変形斜面に発生したものである。そして、これらの重力斜面変形は、地形に表れていただけでなく、発生後の調査によれば特徴的な地質構造としても認められた。それらは、現地調査によれば、地質構造から次の 3 タイプに分けられる:くさび状分離面に沿うすべり、曲げトップリング、流れ盤の地層の座屈である。

1) くさび状分離面に沿うすべり

このタイプの重力斜面変形は最も多くの崩壊に見られたものであり、斜面の内側に楔形の不連続面があり、その上の地層がすべり落ちるタイプである。顕著に認められたのは赤谷の崩壊で、崩壊前後の地形と崩壊後に露出した地質から、赤谷の崩壊の最上部の小崖は、断層沿いおよび面構造沿いのずれとして生じていたことがわかった。

2) 曲げトップリング

このタイプの重力斜面変形は、急傾斜する地層が斜面下方に向かってお辞儀をするように倒れかかる変形で、最上部に線状の凹地を伴うことが多い。北股の崩壊で認められた。曲げトップリングは大規模な崩壊に至らない場合も多いが、北股では線状凹地の下方延長に斜面下方に傾斜する断層があったために、それがすべり面となり、急激な崩壊が発生したものと考えられる。

3) 流れ盤の地層の座屈

このタイプの重力斜面変形は、斜面下方に傾斜する地層が膝を折るようにして座屈したもので、大規模なものは熊野(いや)で認められた。座屈して倒れた部分(膝から下)が取り除かれると、上方の地層は不安定となり、すべり落ちる。この大規模なものは、2008 年台湾の小林村の深層崩壊で認められたものである。

6. おわりに

2011 年の台風 12 号は、50 以上の深層崩壊を発生し、甚大な山地災害を引き起こした。一方で、これらの崩壊は、今までの国内外の経験の中では最も詳細なデータが記録されたものであり、それらの分析は深層崩壊の発生場や時の予測に大きな前進をもたらした。

地形的に見ると、これらの深層崩壊はいずれも発生前に重力によって変形した斜面に発生したものであることが明らかになった。また、その変形の多くは地表面に小規模な崖となって表れていたことから、これらの崖をもとにして深層崩壊の発生場が予測できる見通しが得られた。これらの崖は、空中写真よりも航空レーザー計測によって詳細かつ広域的に抽出することが可能である。

特定できた深層崩壊発生時とレーダーアメダス解析雨量から、深層崩壊が累積雨量 700 mm 程度あたりから発生したことが明らかになった。深層崩

壊を発生させる雨量は、地質と地形特性と関係しており、地域によって異なると推定されるが、西南日本外帯の四万十帯では、この程度の雨量が深層崩壊発生の目安になる可能性がある。

地質構造からみると、発生した深層崩壊の多くは、模形の不連続面(地層の層理面、面構造、断層)に沿ってすべり面を持つ「すべり」のタイプであり、一部に曲げトッピングや座屈を伴うものがあった。楔形の不連続面には、四万十帯の付加時に形成された面構造の寄与が大きい。

台風 12 号が引き起こした深層崩壊によって、甚大な災害と引き換えに、深層崩壊発生の場と時を予測できる見通しが得られたと言える。

謝 辞

本報告は、京都大学防災研究所の松四雄騎、ツォウ・チンイン、山田真澄、深田地質研究所の平石成美、パシフィックコンサルタンツの松澤真との共同研究の成果に負うところが多い。本研究を進めるにあたり、国土交通省近畿地方整備局および奈良県には貴重な航空レーザー計測による 1m メッシュの DEM(数値地形モデル)データを提供いただいた。また、現地調査にあたっては、五条市、十津川村、田辺市の関係各位に便宜を図っていただいた。ここに謝意を表す。