

深層崩壊～その実態と対応～

危機管理技術研究センター長

後藤 宏二

深層崩壊～その実態と対応～

危機管理技術研究センター長 後藤 宏二

1. はじめに

平成9年（1997年）鹿児島出水市針原川、平成15年（2003年）熊本県水俣市集川、平成17年（2005年）宮崎県鰐塚山山系など、近年、深層崩壊による大規模な土石流が発生し下流域に甚大な被害が発生している。また、平成23年（2011年）9月には台風12号にともなう豪雨により、紀伊半島において多数の深層崩壊が発生し、三重県、奈良県、和歌山県では、土砂災害により死者43名、行方不明者13名、全壊家屋98戸、半壊家屋46戸に達する激甚な被害となった（国土交通省砂防部調べ）。台風12号災害では、深層崩壊とみられる崩壊が72箇所確認され、深層崩壊にともなう5箇所の河道閉塞（天然ダム）（以下、「天然ダム」という。）において、越流・決壊による土石流災害のおそれが急迫しているとして、改正土砂災害防止法に基づく緊急調査が実施された。

国土交通省では、平成22年（2010年）8月に「深層崩壊推定頻度マップ」、平成24年（2012年）9月に「深層崩壊溪流レベル評価マップ」、「深層崩壊跡地密度マップ」を公表するなど、深層崩壊に関する調査を進めるとともに、警戒避難体制の強化に向け、深層崩壊の推定頻度が特に高い地域を中心に、大規模な崩壊の発生を検知するセンサーの設置を進めているところである。しかし、深層崩壊の発生要因、規模・影響範囲の予測等については未解明の部分も多く、深層崩壊による被害の防止・軽減に向けた、ハード・ソフト対策を検討する上での課題となっている。

本稿では、近年の大規模土砂災害を踏まえて、深層崩壊の発生実態およびこれまでの取り組みについて報告するとともに、今後、適切かつ効果的な対策を立案するにあたって、解決すべき技術的課題等について紹介する。

2. 深層崩壊の実態

2.1 深層崩壊の特徴

砂防用語集では深層崩壊を、「山崩れ・崖崩れなどの斜面崩壊のうち、すべり面が表層崩壊より深部で発生し、表土層だけでなく深層の地盤までもが崩壊土塊となる比較的規模の大きな崩壊現象」と解説している。また、（独）土木研究所の「深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル（案）」では、深層崩壊の特徴として以下の3点を挙げている。

- ①斜面を構成する土塊は崩壊と同時にバラバラになって移動するか、あるいは原型を留めてすべり始めた後にバラバラになる。
- ②崩壊土塊（土砂）は高速で移動する。
- ③崩壊土塊（土砂）の大部分は崩壊範囲の外へ移動するが多い。

深層崩壊による土砂災害は、一般的な土石流・がけ崩れ災害と比べると、発生頻度は低いといえる。しかし、崩壊規模が大きいと、一度発生すると被害が甚大化するおそれがある。また、深層崩壊は降雨のピーク後に発生する場合があると指摘されており、降雨の

減少をもって、崩壊発生危険性が低くなったと評価することは適切ではないといえる。深層崩壊の発生誘因としては、降雨、地震、融雪、火山噴火等が挙げられるが、発生件数からは降雨と地震によるものが多い（図-1）。

写真-1～写真-4に豪雨および地震により発生した深層崩壊を示す。

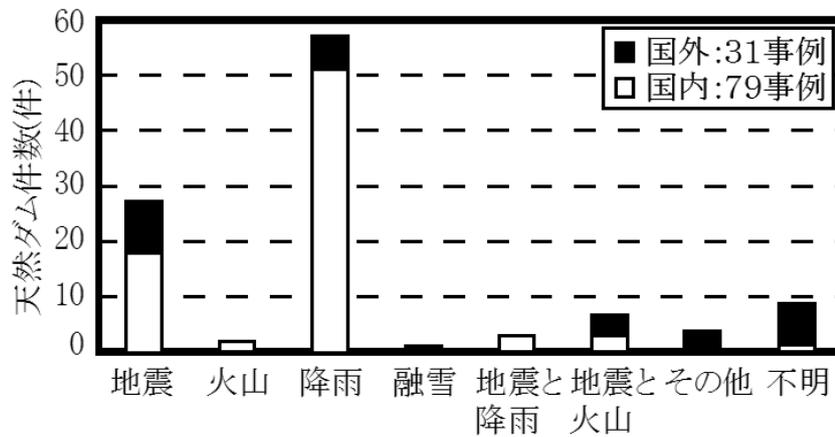


図-1 深層崩壊の発生誘因
 (旧建設省中部地方建設局河川計画課：天然ダム調査事例集と米国土木学会 Landslide dams より)



写真-1 宮崎県鱈塚山山系 (豪雨)



写真-2 奈良県十津川村栗平 (豪雨)



写真-3 宮城県栗原市沼倉裏沢 (岩手・宮城内陸地震)



写真-4 宮城県栗原市湯ノ倉 (岩手・宮城内陸地震)

2.2 深層崩壊による災害形態

深層崩壊は発生頻度は低いものの、一度発生すると崩壊規模が大きいことから甚大な被害が発生するおそれがあることは前述した。深層崩壊による災害形態としては、崩壊土砂が直接河道に流入して土石流化する場合と、崩壊土砂が河道を閉塞し天然ダムを形成する場合に大別される。前者は崩壊土砂が流動化して溪流等を流下し、下流の集落で氾濫することによって被害が生じる。後者については、被害形態はさらに2つに大別され、崩壊土砂が河道内に堆積し天然ダムを形成し、その上流における湛水による浸水被害と、天然ダムが決壊することによって生じる土石流・洪水に起因する氾濫被害に分類される（図-2）。

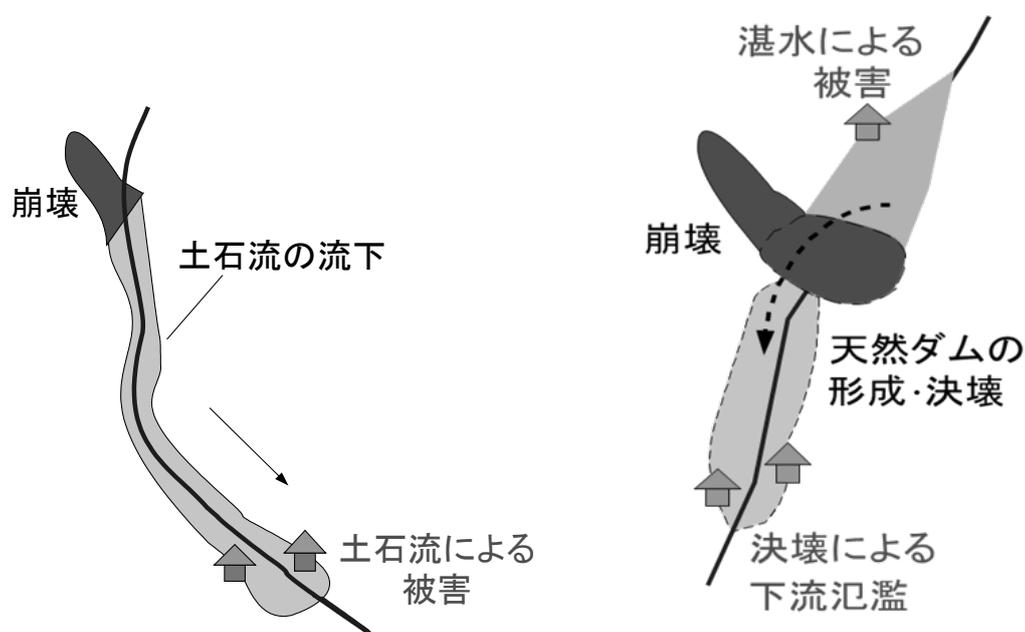


図-2 深層崩壊による災害形態

前者の形態の災害事例としては、平成9年（1997年）7月の鹿児島県出水市針原川、平成15年（2003年）7月の熊本県水俣市集川の土石流災害が挙げられる。針原川では21名、集川では15名の人的被害が発生した。また、地震による深層崩壊では、平成20年（2008年）6月の岩手・宮城内陸地震において、ドゾウ沢で発生した土石流が駒の湯温泉を襲い7名の犠牲者を出した土石流災害がある（写真-5）。

後者の形態のうち、天然ダムの湛水による災害事例としては、明治44年（1911年）8月長野県白馬村において、稗田山の崩壊土砂が姫川との合流地点を閉塞し、上流の下里瀬集落の大半を水没させ、死者23名の人的被害が発生している。また、天然ダム決壊による土石流・洪水被害事例としては、明治22年（1889年）十津川災害、昭和28年（1953年）有田川災害が挙げられる。十津川災害では、奈良県・和歌山県において多数の天然ダムが形成され、その決壊により1,000名以上の犠牲者が生じている。また、有田川災害では、19箇所天然ダムが形成され、残存した複数の天然ダムが、2カ月後の台風13号の豪雨により決壊した。そのうち花園村の金剛寺で発生した天然ダム決壊では下流に洪水被害を引き起こしている（写真-6）。



写真－5 宮城県栗原市ドゾウ沢
(岩手・宮城内陸地震)



写真－6 昭和 28 年（1953 年）有田川災害
花園村金剛寺(旧大塔村)

地震によるものとしては、平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震、平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震において多数の天然ダムが発生し、集落や温泉旅館が湛水により水没したが、国土交通省・都道府県により施工された仮排水路等の緊急工事により、天然ダムの決壊までにはいたらなかった。

海外の事例としては、平成 21 年（2009 年）8 月に台湾に上陸したモーラコット台風による土砂災害が挙げられる。モーラコット台風は、3 日雨量約 2,800mm を越える異常な降雨をもたらし、高雄県小林村で発生した大規模な深層崩壊や天然ダムの決壊による土石流・洪水等により 500 名以上が犠牲となった。

2.3 深層崩壊の発生状況

（独）土木研究所は、明治時代以降から平成 22 年（2010 年）度までの間において、降雨により発生したと考えられる深層崩壊事例を「過去の深層崩壊事例について（～平成 22 年度）」として公表している。この事例には、既往の調査結果等から深層崩壊と確認された、または、推定される事例および崩壊規模が大きい事例（崩壊土砂量が概ね 10 万 m³以上、崩壊面積が 1 ha 以上、崩壊深さが 5m 以上）の 188 事例が掲載されている。発生地域は北海道・東北地方から四国・九州地方に及んでおり、なかでも奈良県、和歌山県の発生事例が多いことが特徴的である。

図－3 は戦後において、一つの降雨または地震により複数の深層崩壊が発生した地域を示したものである。ここで、降雨によるものは、上述の「過去の深層崩壊事例について」より抽出し、地震によるものは代表的なものを示した。この図から、一つの降雨および地震において深層崩壊が複数発生している地域は、九州南部から四国、紀伊半島までの西南日本に集中していることが窺える。また、東北地方では豪雨による深層崩壊の複数発生はなく、地震によるもののみとなっていることが分かる。

図－4 は明治期以降における、崩壊土砂量 10 万 m³以上の崩壊発生状況を経年的に示したものである。発生件数が多い年は、明治 22 年（1889 年）十津川災害、昭和 28 年（1953 年）有田川災害、平成 23 年（2011 年）台風 12 号災害によるものである。10 年間移動平均をみると、近年、増加傾向であることが分かる。また、図－5 は過去 30 年間で、10 年単位

で区切り、50mm/h以上の降雨の発生回数、土砂災害発生件数、深層崩壊発生件数の10年平均を示したものである。この図からも50mm/h以上の降雨の発生回数が増加するのとあわせ、土砂災害発生件数と深層崩壊発生件数が増加していることが分かる。

地球温暖化等による降雨の激甚化をはじめ、大規模地震の発生、火山活動の活発化等が指摘されるなか、深層崩壊の発生リスクは今後とも高まっていくものと推測され、早急に深層崩壊をはじめとする大規模土砂災害への対応策を検討する必要があるといえる。

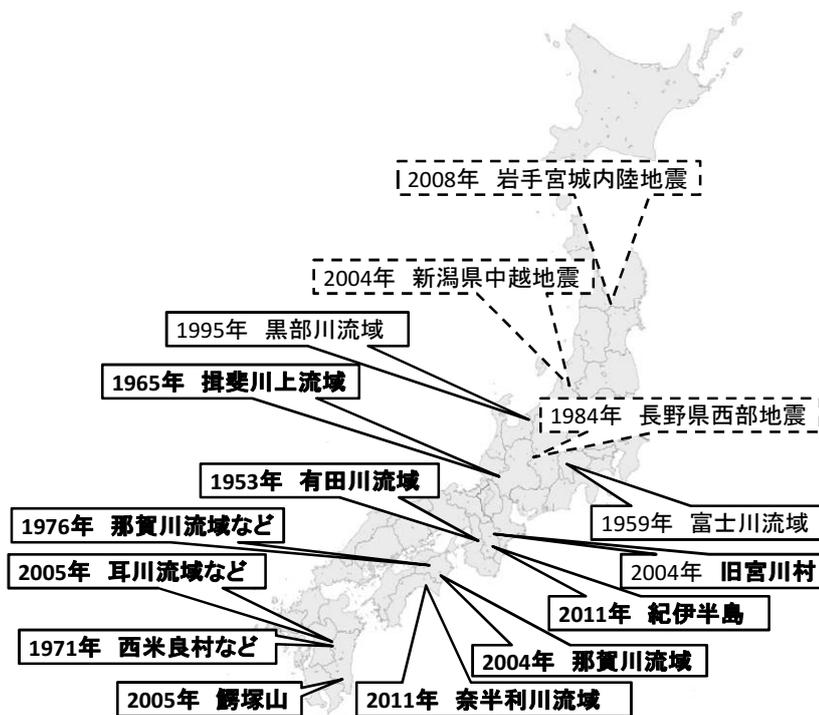


図-3 深層崩壊が複数同時発生した箇所
実線は降雨、破線は地震によるもの

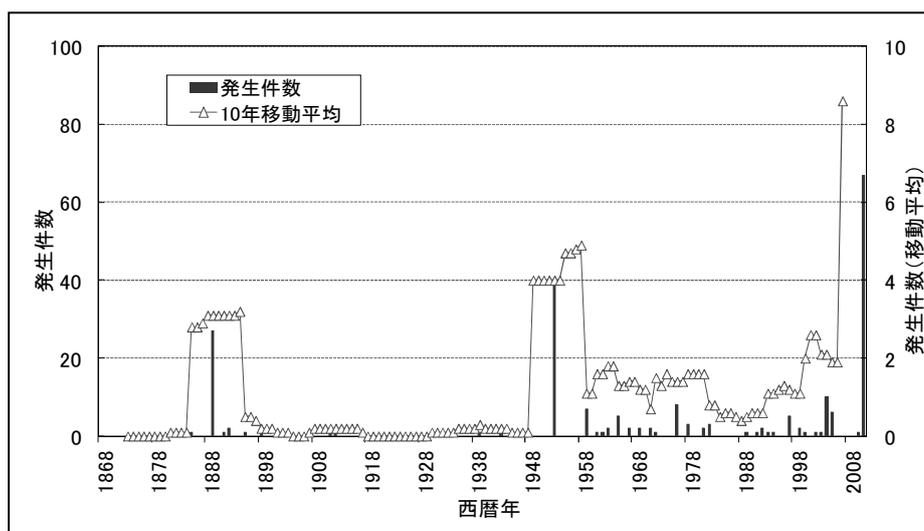
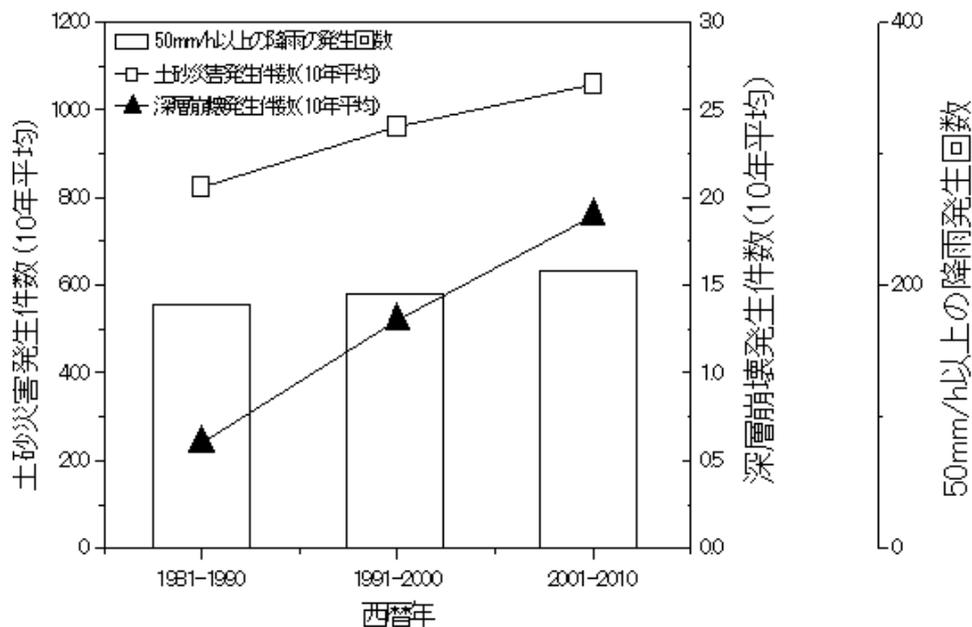


図-4 深層崩壊発生の経年変化



図－5 降雨と深層崩壊の発生状況

3. 深層崩壊の定義

3.1 地すべり、表層崩壊、深層崩壊の特徴

前章において、深層崩壊の特徴および災害形態について若干触れたが、ここでは（社）砂防学会が平成24年（2012年）3月に取りまとめた、「深層崩壊に関する基本的事項に係わる検討委員会の報告・提言（以下、「提言」という。）」を参考として、「地すべり」、「表層崩壊」、「深層崩壊」の特徴を対比しつつ整理を行う。

一般に地すべりは、その移動土塊・岩塊の動きは継続的あるいは断続的であり、その移動速度は小さく、土塊・岩塊は移動中にあまり攪乱を受けない。一方、崩壊は土塊・岩塊の動きは突発的で一過性であり、その移動速度は大きく、運動中に激しい攪乱を受けて原形を保たない場合が多いとされる。地すべりと崩壊の特徴を比較したものを表－1に示す。

さらに、崩壊は主としてすべり面の深さにより表層崩壊と深層崩壊に分けられる。表層崩壊はすべり面の深さが約2m以内であり、移動土塊は表層の風化土層である場合が多く、地質に対する関連性は少ないのに対し、深層崩壊のすべり面は、表層崩壊よりも深い位置にあり、移動土塊・岩塊は基盤を含んで移動する場合が多く、特定の地質や地質構造の地域で多く発生し、特に我が国では四万十帯などの付加体での発生頻度が高いとされる。表層崩壊と深層崩壊の特徴を比較したものを表－2に示す。

すべり面の深さが異なることより、表層崩壊では樹木の根系による緊縛力が、崩壊抑止効果としてある程度発揮される場合があるが、深層崩壊ではすべり面が深く根系の緊縛力の効果は期待できない。

すべり面の深さの違いは、崩壊土砂量の多少にも影響し、表層崩壊に比較して、深層崩壊の土砂量は大きいものとなる。深層崩壊の土砂量は、約1万m³～数億m³まで非常に範囲が広く、土砂量が大きいほど等価摩擦係数が小さくなり到達距離は大きく、また、土砂量

が大きいほど発生頻度は小さくなる。このような特徴は、表層崩壊および深層崩壊の発生・流下機構の違いを反映していると考えられる。表-3 に表層崩壊と深層崩壊の規模と特徴を対比して示す。また、「地すべり」、「表層崩壊」、「深層崩壊」の区分フローを図-4 に示す。

表-1 地すべりと崩壊の比較

| | 地すべり | 崩壊 |
|-------|------------------------|-----------------------------------|
| ①地形 | 緩勾配 地すべり地形 | 急勾配 非火山地域では斜面の変形等の特徴が見られる場合がある |
| ②活動状況 | 継続的、断続的に動いている、再発性 | 突発性 |
| ③移動速度 | 小さい | 大きい |
| ④土塊 | 乱れない(原型をほぼ保つ)、斜面上にとどまる | 乱れる(原型が崩れる)、大部分が斜面から抜け落ちる |

表-2 表層崩壊と深層崩壊の比較

| | 表層崩壊 | 深層崩壊 |
|-------------|----------|--|
| ①地質 | 関連が少ない | 地質、地質構造(層理、褶曲、断層等)との関連が大きい |
| ②兆候(地形・地下水) | ほとんどない | 有る場合がある。非火山地域ではクリープ、多重山稜、クラック、末端小崩壊、はらみだし、地下水位変動など |
| ③深さ | 浅い | 深い |
| ④土質 | 表層土 | 基盤 |
| ⑤植生の影響 | 有り | なし |
| ⑥規模 | 小規模(比高小) | 大規模(比高大) |

表-3 深層崩壊の規模と特徴

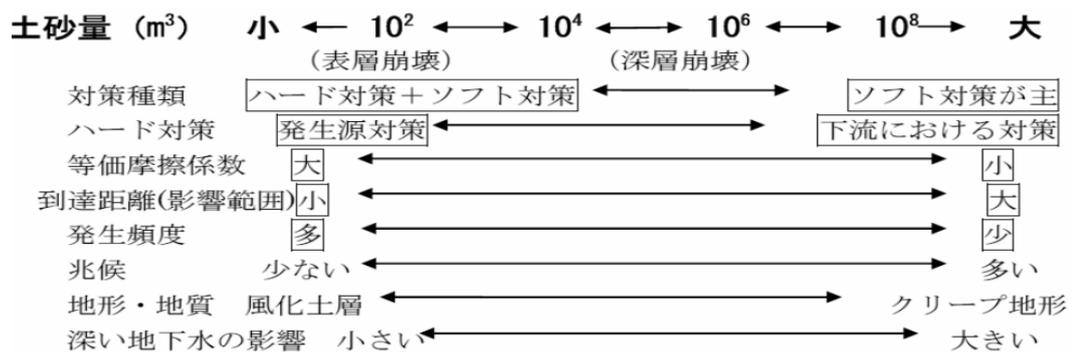
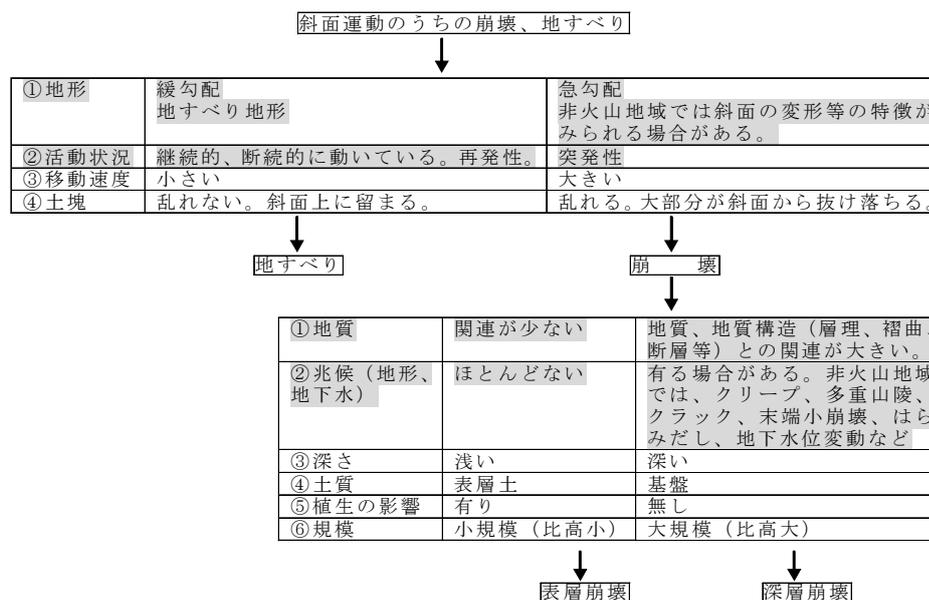


表-4 地すべり、表層崩壊、深層崩壊の区分フロー



注) 網掛け部は発生前の予測段階で調査が比較的容易な項目。

3.2 深層崩壊の定義

(社)砂防学会の「提言」では、「地すべり」、「表層崩壊」、「深層崩壊」の特徴を踏まえ、深層崩壊の定義を以下とおりに提案している。

「山地および丘陵地の斜面の一部が表土層（風化の進んだ層）のみならずその下の基盤を含んで崩壊する現象を指す。その特徴を述べれば移動土塊・岩塊の動きは突発的で一過性であり、その移動速度は大きく、運動中に激しい攪乱を受けて原形を保たない場合が多い。特定の地質や地質構造の地域で多く発生し、特に我が国では四万十帯などの付加体における発生頻度が高い。すべり面の位置が深いために樹木の根系による崩壊抑止効果は期待できない。表層崩壊に比べて土砂量は大きく、土砂量の範囲は極めて広い。土砂量が多いほど等価摩擦係数が小さくなり到達距離は大きくなる傾向を持つ。土砂量が多いほど発生頻度は小さくなる。発生誘因には、降雨、地震、融雪、火山噴火等があるが、発生件数からは、降雨と地震によるものが多い。」

上記の定義では、移動土塊・岩塊の動きが突発的かつ一過性であること、運動中に攪乱を受け原形を保たないという点で地すべりとの相違を表し、すべり面の深さ、樹木の根茎の崩壊抑止効果の点から表層崩壊との相違を表しているといえる。しかしながら、本定義は定性的な内容となっており、例えば、深層崩壊の土砂量を取り上げても、表層崩壊との境界上の規模のものから、数億 m^3 に達する巨大崩壊まで非常に幅広い、また、地すべりと崩壊の区分を、「①地形」、「②活動状況」、「③移動速度」、「④土塊」の観点から整理しているが、両者の中間的な土砂移動現象の存在は否定できないところである。深層崩壊対策の検討にあたっては、上述した特徴を対比・整理することによる定義に加え、土塊・岩塊の移動に関する物理モデル等からのアプローチが必要であると考えられる。

4. 深層崩壊危険地域に関するマップ

4.1 深層崩壊推定頻度マップ

深層崩壊に起因する大規模土砂災害の防止・軽減対策を検討するにあたって、深層崩壊の発生するおそれのある箇所を予測することは極めて重要である。

(独)土木研究所では、明治期(1968年)以降に豪雨または融雪により発生した深層崩壊発生事例のうち、発生場所と発生時期が特定できる122事例を用いて、地質や起伏量と深層崩壊発生との関係を整理した。その結果、

「第四紀隆起量と崩壊密度には密接な関係が認められる」、「第四系の崩壊密度は第三系、中生代に比べて小さい」、「付加体の崩壊密度は第四紀隆起量、地質年代によらず付加体以外のものに比べて高い」という知見を得た(図-6)。これらの知見を基に、深層崩壊の発生密度を全国平均の5倍以上の地域を「特に高い」、1倍以上の地域を「高い」、0.1

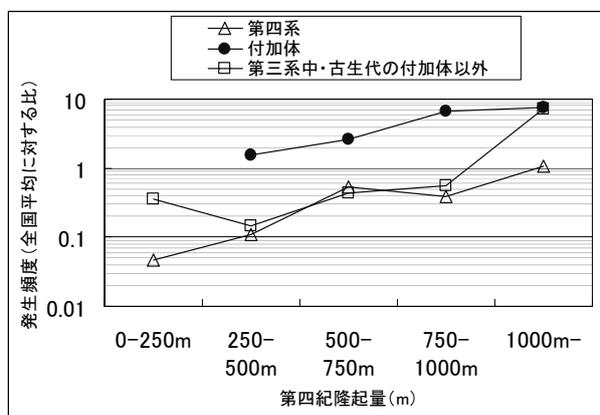


図-6 第四紀隆起量、地質と深層崩壊の関係

倍以上の地域を「低い」、それ以下の地域を「特に低い」の4段階に区分し、地図上で表したものが深層崩壊推定頻度マップである（図-7）。なお、深層崩壊推定頻度マップは、深層崩壊の発生する危険度を全国レベルで相対的に評価したものであることに留意する必要がある。

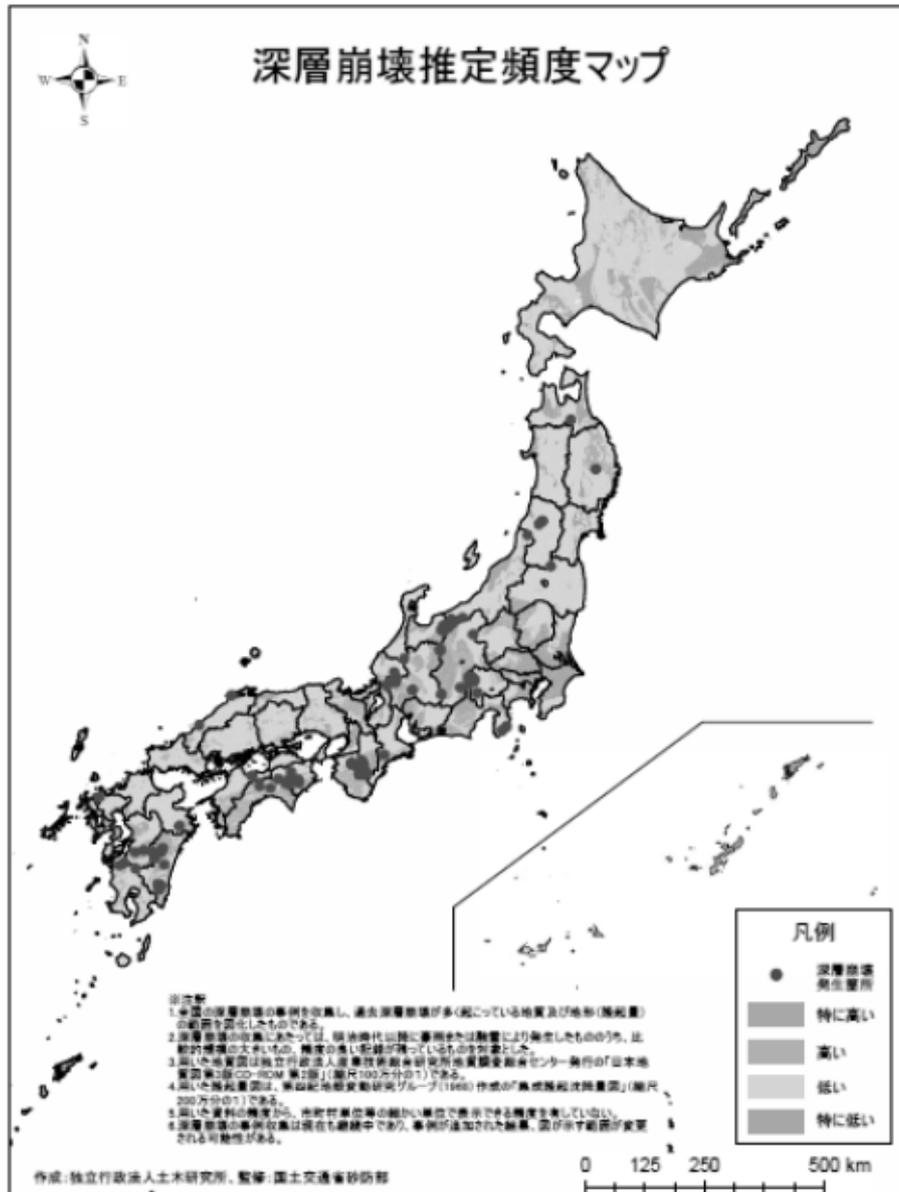


図-7 深層崩壊推定頻度マップ

4.2 深層崩壊溪流レベル評価マップ

(独)土木研究所では、深層崩壊推定頻度マップの作成に引き続き、溪流（小流域）レベルで危険度を評価する手法を「深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル(案)」として取りまとめた。

既往の調査から、「深層崩壊が過去に発生した箇所の周辺」、「線状凹地、岩盤クリープ斜面等の深層崩壊の前兆現象と考えられる地形的な特徴が見られる箇所の周辺」、「斜

面勾配が急でかつ集水面積が大きい斜面」において、深層崩壊の発生する確率が高いことが明らかとなっている。本マニュアルではこれらを踏まえ、以下の三条件を深層崩壊の発生する危険度の高い溪流を抽出する指標とし、より多くの条件を満たす溪流を危険度の高い溪流として評価することとしている(図-8)。

- ①深層崩壊の実績のある溪流(過去の文献や空中写真の判読により抽出)
- ②深層崩壊の発生と関連性の高い地質構造・微地形要素がある溪流(地質図や空中写真判読により抽出)
- ③勾配および集水面積の大きい斜面が多い溪流(DEMを用いて算出)

深層崩壊の発生と関連性の高い地質構造・微地形要素、地形量については、地質や気候の影響などから地域によって異なることが考えられるため、過去の発生履歴と地質構造・微地形要素、地形量の間を整理し、検討対象地域ごとにそれぞれの指標を設定することとしている。本手法により深層崩壊のおそれのある溪流を抽出した例を図-9に示す。

溪流レベルでの評価結果について、平成23年の台風12号により深層崩壊が発生した紀伊山地で検証を行ったところ、相対的な危険度が高いほど深層崩壊の発生率が高く、相対的な危険度が高い溪流では、相対的な危険度が最も低い溪流に比べて発生率が14倍となった(図-10)。なお、本マップについても評価区域内の相対的な危険度を表したものであることに留意する必要がある。

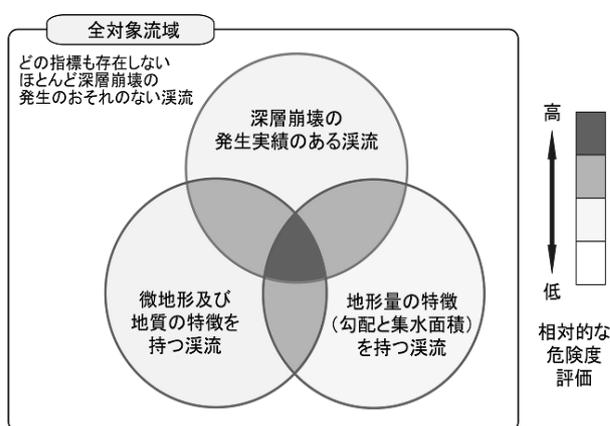


図-8 危険度評価の指標

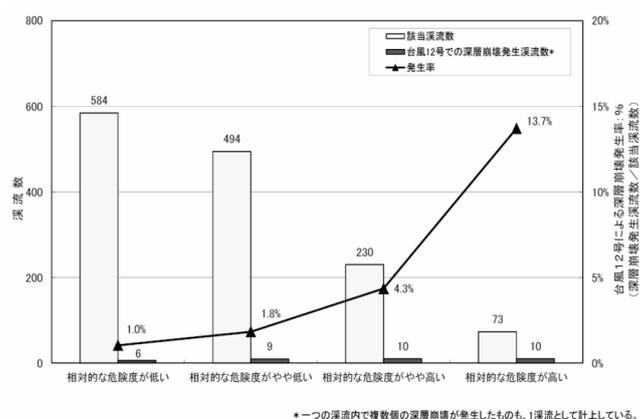


図-10 紀伊山地における危険度別溪流数と台風12号による深層崩壊発生状況

5. 改正土砂災害防止法に基づく緊急調査

平成23年(2011年)5月に施行された改正土砂災害防止法では、天然ダムによる湛水および決壊にともなう土石流、火山噴火にともなう降灰後の土石流、地すべりによる重大な土砂災害が急迫していると認められるとき、国または都道府県は緊急調査を実施し、被害が想定される区域と時期について、土砂災害緊急情報として関係市町村長に通知し避難指示等の判断を支援するとともに、一般に周知することと規定されている。

国土技術政策総合研究所及び(独)土木研究所は、台風12号災害にかかる緊急調査等の一連の対応において、近畿地方整備局に対し技術的支援を継続的に行った。その概要を以下に記述する。



図-9 深層崩壊溪流レベル評価マップ

災害発生直後より、ヘリコプターおよび衛星画像を用いた天然ダムの形成確認調査を実施し、決壊による土石流災害のおそれのある天然ダムとして5地区（赤谷、長殿、栗平、北股、熊野）が抽出された。形成確認調査に続き、土石流による被害のおそれのある区域を推定するため、天然ダムの比高等の形状計測をヘリコプターからレーザー測距計を用いて行い、一次元河床変動計算と二次元氾濫計算を組み合わせた氾濫シミュレーション計算により想定氾濫区域の推定を行った。台風12号災害では、9月6日に緊急調査に着手し、2日後の9月8日に土石流等による被害のおそれのある区域を土砂災害緊急情報として通知・公表している（図-11）。

想定氾濫区域の推定と並行して、天然ダムの監視・観測体制の整備を進めた。天然ダムの決壊形態としては、過去の事例では越流浸食によるものが多く、決壊による土石流被害を軽減するためには、湛水位を把握し越流の開始時期を予測することが極めて重要となる。しかしながら、天然ダムの形成箇所は、主に山間部であり周辺の地形が急峻であること、また、道路が斜面崩壊等により寸断され陸路によるアクセスが困難であることが多く、監視・観測体制を整備するにあたっての大きな支障となっていた。

今回、湛水位の観測に岩手・宮城内陸地震の際に開発された土研式水位観測ブイ（以下、「観測ブイ」という。）を使用した。観測ブイは上述した悪条件下での使用を想定し、ヘリコプターによる運搬・設置、衛星通信を介したデータ送信等の機能を有したものである（写真-7）。また、観測ブイによる水位観測に加えて、監視カメラ、ワイヤーセンサー等の監視・観測機器の整備を図り、土石流等の発生検知に努めたところである。

なお、市町村等に通知した土砂災害緊急情報は、その後の地形状況の変化およびレーザープロファイラによる地形計測結果等を反映させ氾濫シミュレーション計算を再度行い、想定氾濫区域の変更について通知・周知を行っている。

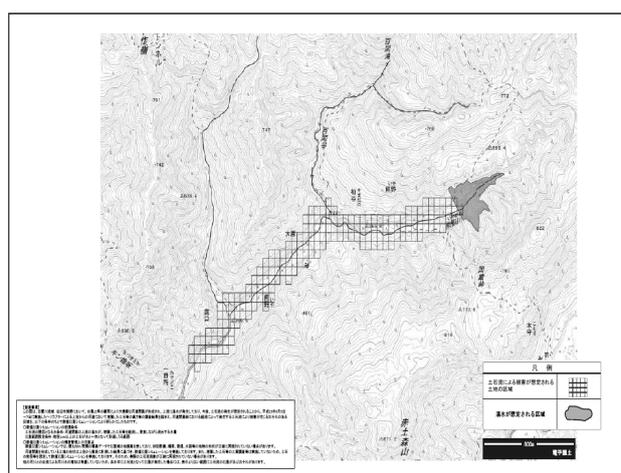


図-11 土砂災害が想定される区域



写真-7 土研式水位観測ブイ

6. 土砂災害監視システム

6.1 大規模崩壊監視警戒システム

深層崩壊の発生に起因し天然ダムが形成され、その天然ダムが決壊した場合、大規模な

土石流が発生し下流域に甚大な被害をおよぼすおそれが高い。また、土砂災害防止法では、被害の想定される区域と時期の情報を土砂災害緊急情報として、迅速に市町村等へ通知することを求めている。迅速な対応を可能とするためには、天然ダムの発生した時期、場所を速やかに把握できる体制を構築する必要があり、現在、国土交通省では、「雨量レーダー」、「振動センサーによる大規模土砂移動検知システム」および「衛星 SAR 画像による大規模崩壊箇所の緊急判読調査」の手法を組み合わせた大規模崩壊監視警戒システムの構築を進めている。

6.2 振動センサーによる大規模土砂移動検知システム

深層崩壊等の大規模な土砂移動現象が発生した際に生じる地盤振動は、条件によっては数 10km 先の地震計においても検知されることが従来から知られている。

振動センサーによる大規模土砂移動検知システムは、山地地域に配置した振動センサーをネットワーク化し、検知した地盤振動から地震の震源特定技術を用い、大規模な土砂移動現象の発生位置と時間を推定するものである。

国土交通省および各地方整備局では、深層崩壊の推定頻度が特に高い地域において、振動センサーによる大規模土砂移動検知システムを構築し、深層崩壊および天然ダムの監視警戒体制の整備を図っているところである（図-12）。

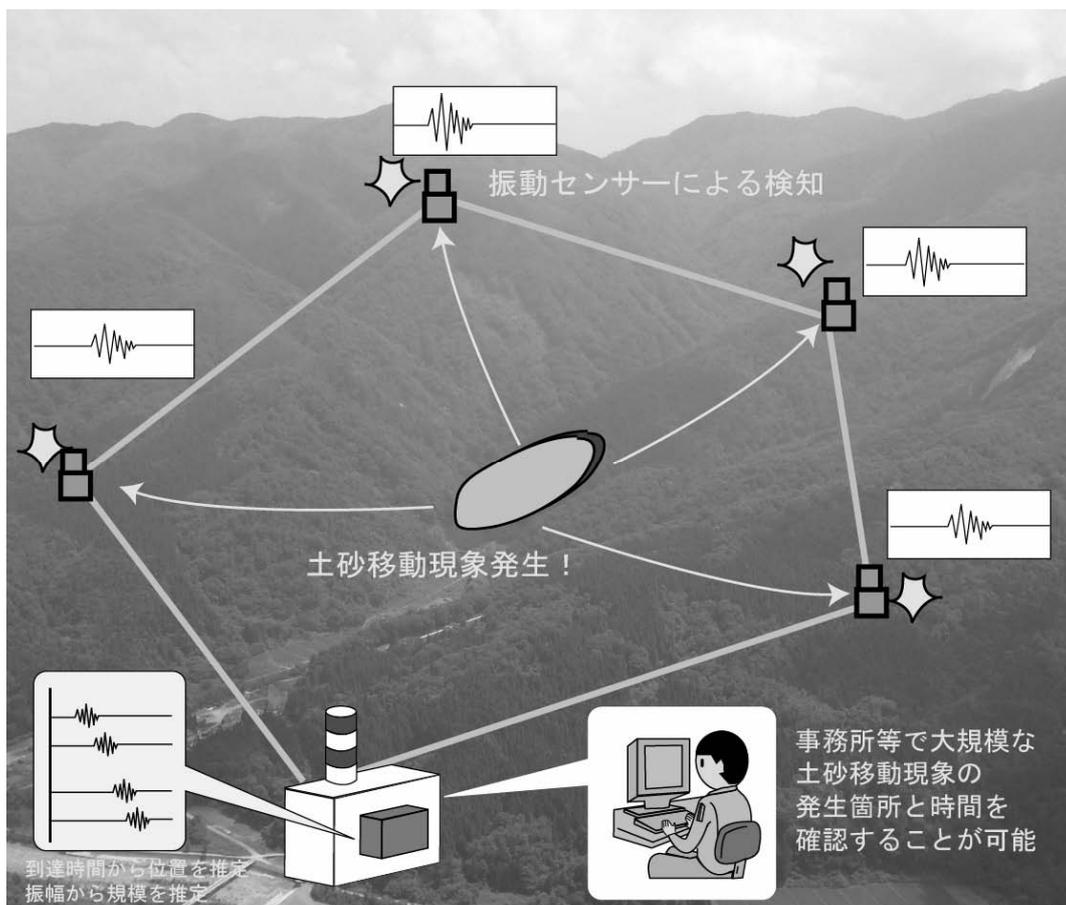


図-12 大規模土砂移動検知システムの概要

6.3 衛星合成開口レーダ画像による深層崩壊判読

衛星合成開口レーダー（以下「衛星 SAR」という。）は、夜間や悪天候等の状況に左右されることなく画像撮影が可能である特徴を有している。平成 23 年(2011 年)年台風 12 号災害では、衛星 SAR 画像を用いて 8 箇所の深層崩壊等の抽出を行うことができた(写真-8)。

衛星 SAR 画像の判読においては、図-13 に示すとおり光学画像の判読とは異なる特徴があり、これらの特徴を踏まえた、衛星 SAR 画像の撮影条件等の検討を目的として、入射角、分解能等の異なる複数の画像を用い、台風 12 号災害において発生した深層崩壊の視認性等の評価を行った。天川村坪内地区の崩壊地画像を参考事例として示す(写真-9、10)。

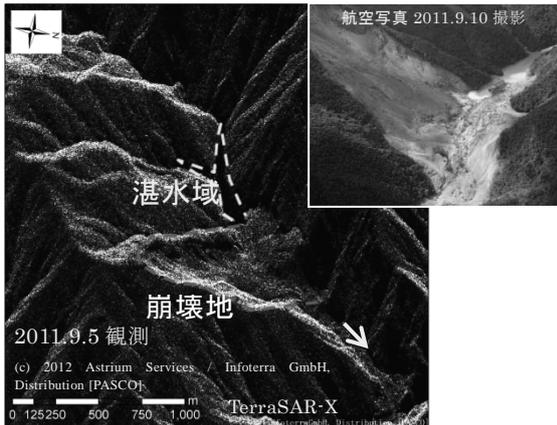


写真-8 衛星 SAR 画像により発見された深層崩壊（奈良県五條市赤谷）

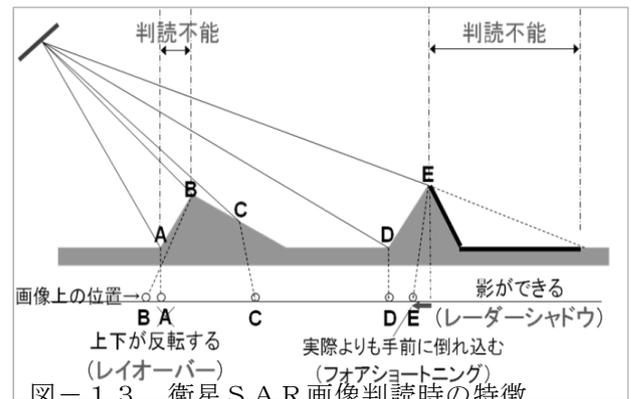


図-13 衛星 SAR 画像判読時の特徴

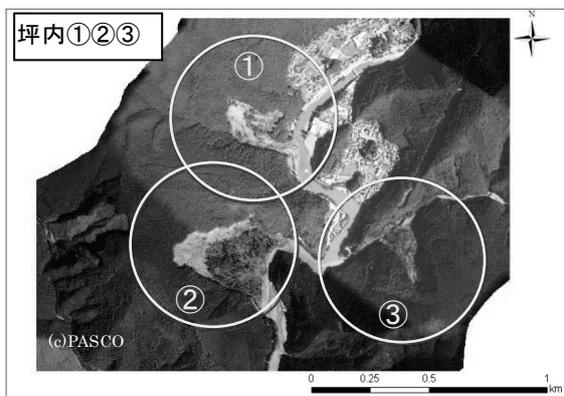


写真-9 奈良県天川村坪内地区（簡易オルソ）

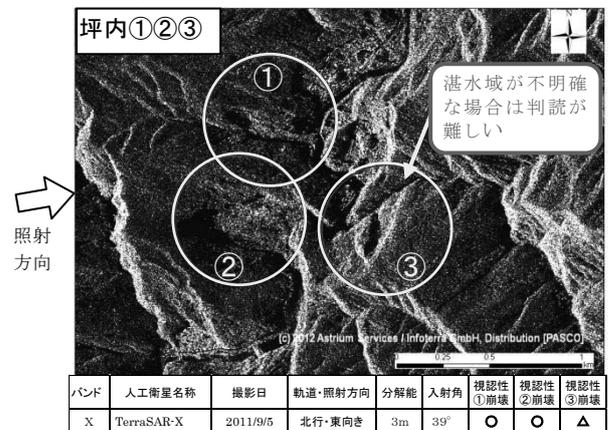


写真-10 奈良県天川村坪内地区（衛星 SAR 画像）

衛星 SAR 画像の撮影条件等についての検討結果を以下に列記する。

①電波の入射角

衛星 SAR 画像撮影時の入射角が小さくなると、入射方向と正対する箇所がレイオーバーとなって判読不能となる。また、反対に入射角が大きいと急勾配地域でレーダーシャドウの割合が大きくなる傾向がある。撮影時の入射角としては、概ね 35° ～ 50° の入射角が適していると評価された。

②分解能

天然ダムの抽出を目的とした場合、衛星 SAR 画像の分解能は 3m より高分解能であることが必要である。しかし、現在運用中の衛星では、分解能 3m の場合における撮影範囲面積が 1,500km²~2,500km² であるのに対して、分解能 1m 程度の場合には撮影範囲面積が 1/10 以下となるなど、分解能により撮影範囲面積が大きく変化することに留意する必要がある。

③撮影回数

片側照射の衛星 SAR 画像のみでは、写真-11 に示すように斜面方位や斜面の傾斜角度によっては抽出率が落ち、台風 12 号災害の事例では深層崩壊による天然ダムの抽出率は 50~70% 程度となった。しかし、東西両側からの画像 2 枚を用いた場合には抽出率は約 90% に向上した。

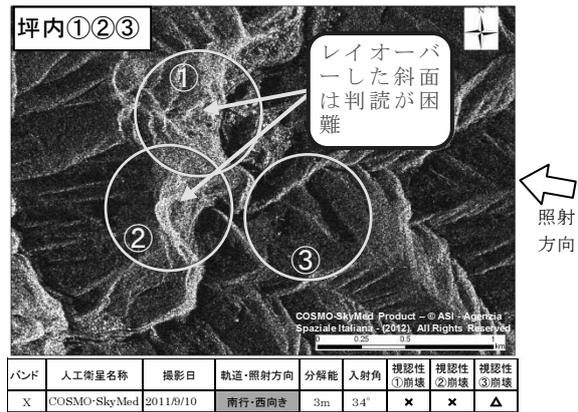


写真-1 1 電波入射方向と正対する衛星 SAR 画像

④判読する衛星 SAR 画像の正立配置

照射方向と衛星 SAR 画像の配置の関係については、照射方向が上方からとなるように回転させて画像を配置した方が、より正確な判読が可能であった(写真-12)。

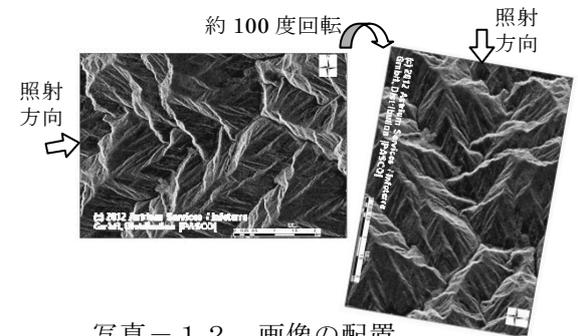


写真-1 2 画像の配置

⑤判読困難箇所

水平投影面積が 1ha 未満の天然ダムは判読が困難であった。また、写真-13 のように、視認性が良好な画像であっても、河道閉塞による湛水域が形成されていない場合には、大規模な崩壊地であっても見逃し易いことに注意し判読作業を行う必要がある。

⑥画像判読の手順

画像判読を行う際には、天然ダムの決壊にともない甚大な被害が予測される集落の上流および集水面積が大きく天然ダムが短時間で満水になると予想される本川沿いを最優先に判読・確認を行う。続いて、主要支川、支溪へと順次判読・確認を行うのが効率的である。

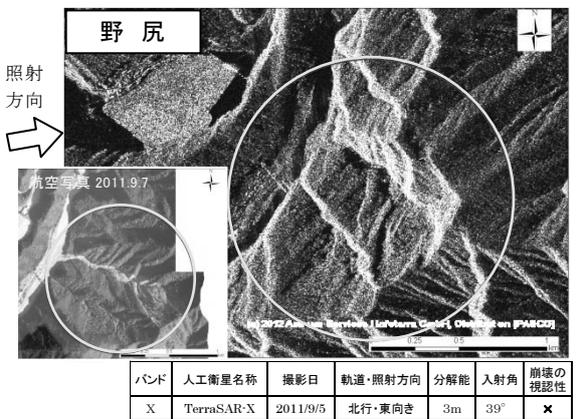


写真-1 3 湛水域が無く崩壊地等の判読が困難な衛星 SAR 画像

⑦入手画像の選定

現在運用されている衛星 SAR 衛星の撮影頻度は、衛星軌道位置から 4 日に 1 回程度の衛星から約 12 時間毎まで様々である。また、画像撮影依頼から画像入手までに要する時間も幅がある。これらを念頭に置き、良好な条件で、必要範囲の画像を最速で入手可能な衛星を選定することが重要である。

6.4 深層崩壊と降雨との関係

深層崩壊対策を進める上で、発生箇所の予測と同様に重要なものとして、深層崩壊を引き起こす降雨条件の把握等が挙げられる。

(独)土木研究所が取りまとめた、「過去の深層崩壊事例について（～平成 22 年度）」のうち、アメダスが整備された昭和 51 年（1976 年）以降の深層崩壊を対象として、一つの降雨で一つの深層崩壊が発生した事例（以下「単発イベント」という。）と複数の深層崩壊が発生した事例（以下「同時複数イベント」という。）に着目し、発生日およびその前 3 日間の計 4 日間を解析対象期間として、連続 1 時間、3、6、12、24、48、72 時間の最大雨量との関係を整理を行った。

図-14 は深層崩壊を起こした降雨について、各連続時間ごとに最大雨量の頻度分布を示したものである。最大雨量が連続 12 時間以内の場合では、単発イベントと同時複数イベントの最大雨量は明確に分離できないが、連続 48 時間以上となると、1 つの同時複数イベントを除き、連続 48 時間雨量 600mm で明瞭に分離できた。このことから、ある一定規模以上の降雨（最大 48 時間雨量で 600mm 以上）があった場合に、複数の深層崩壊が発生する可能性があることを示唆しているものと考えられる。引き続き、各種降雨指標を用いた検討を行い、深層崩壊を引き起こす降雨条件の把握、深層崩壊の発生時期の予測へと進めていきたいと考えている。

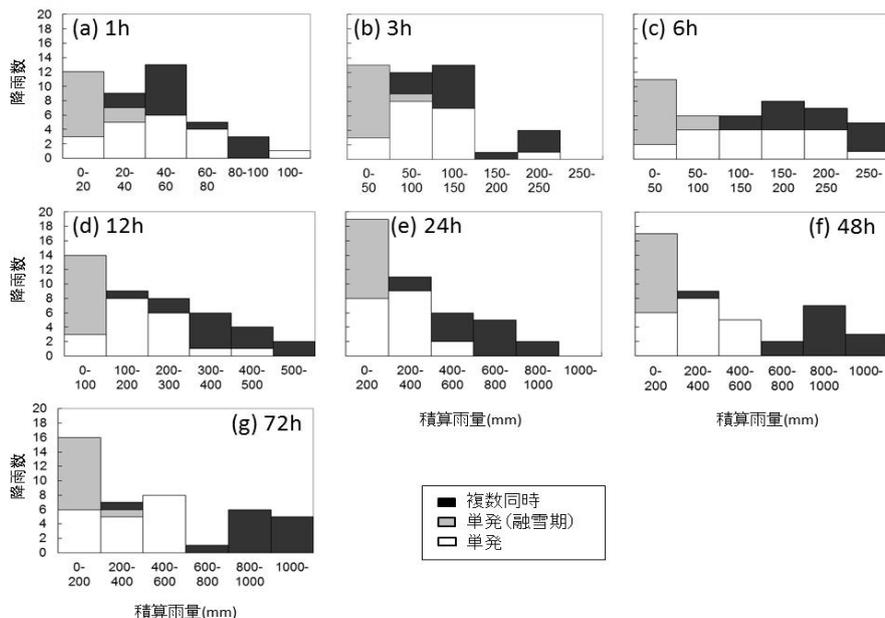


図-14 深層崩壊を引き起こした降雨の最大雨量の頻度分布

7. 深層崩壊に対する今後の対応

7.1 深層崩壊対策に必要な調査・研究

これまでも述べてきたが、深層崩壊による被害の防止・軽減に向けた対策を検討する上で、深層崩壊の発生する恐れのある地域を把握することは極めて重要である。また、警戒・避難体制の実効性を高めるためには、深層崩壊の発生を一定の精度で予測することが必要である。調査・研究を推進するにあたっては、深層崩壊の発生頻度が必ずしも高くないことを念頭に置き、成果の検証を行いながら、具体的な対策に結びつけていく必要があると考える。今後、取り組むべき事項としては以下の内容が挙げられる。

- ①発生・移動機構の解明
- ②発生危険個所の予測
- ③発生規模の予測
- ④発生時刻の予測
- ⑤発生頻度の評価
- ⑥被害範囲・外力の推定

発生・移動機構の解明にあたっては、豪雨および地震による深層崩壊の発生機構に関する物理モデルからのアプローチ、地質構造や岩盤内の浸透流の移動過程、地震動の伝播特性等について検討が必要であると考えられる。また、航空レーザー測量や空中電磁探査、人工衛星リモートセンシングなどの技術を用いて、従来得るのが困難であった詳細な表面地形、面的な地下構造、微小な地表面の変位などの情報が得られるようになってきている。このような最新の技術も活用しながら発生機構の解明や発生予測手法の確立へとつなげていくことが必要である。

7.2 深層崩壊対策の基本的考え方

深層崩壊対策は、一般の土砂災害対策と同様、ハード対策とソフト対策を組み合わせる実施することが基本となる。但し、深層崩壊の場合は崩壊土量が大規模なものとなることを踏まえ、ハード・ソフト対策をより一層効果的に連携させることが求められる。

構造物（ハード対策）により、崩壊発生にともなう移動土砂量を低減させ、土砂の到達範囲の縮小や外力の低下を図った上で、ソフト対策による的確な避難を実施し、人命被害の回避につなげることが基本と考えられる。ハード・ソフト対策をより確実なものとしていくために、今後、取り組むべき事項としては以下の内容が挙げられる。

【ハード対策】

- ①作用外力に応じた施設の柔軟な設計と被害軽減効果の評価
- ②より効果の高い施設の配置計画や構造、形式の選定

【ソフト対策】

- ③深層崩壊の特性を踏まえた警報の運用
- ④安全な避難場所の確保
- ⑤前兆的現象の監視と避難への活用
- ⑥災害時の避難行動等の分析と地域防災計画へのフィードバック

また、対策の実施にあたっては、調査・研究の成果を速やかに対策へと反映させ、より合理的な対策へとつなげていくことが重要である。さらに、深層崩壊が発生した際の緊急的な対応としては、迅速に現地状況を把握し、関係機関と情報共有を図り円滑な住民の避難行動に結びつけることが求められる。具体的には、前述した大規模崩壊監視警戒システムの整備を推進し、国土監視機能を高め、迅速な初動対応を可能とする体制を構築する必要がある。また、天然ダムの決壊等への対応においては、被害の想定される区域と時期をより短時間に精度良く推定することを可能とする、観測機器や予測技術の開発を進める必要がある。

8. おわりに

深層崩壊は、規模が大きいため一度発生すると、尊い人命が失われるとともに地域に甚大な影響をもたらす。

深層崩壊の発生頻度は表層崩壊に比べると比較的低く、また、地質や地質構造の影響を強く受けるため発生・移動機構等に不明の点も多い。現在、国土交通省では、河川砂防技術研究開発公募「深層崩壊の発生危険斜面の抽出手法および避難基準策定手法の開発」において発生・移動機構および危険箇所予測等の検討を行っているところである。

深層崩壊対策を進めていく上では、少なくとも人命の被害は防ぐという認識に立ち、ハード・ソフト対策を積極的に推進するとともに、「発災時の緊急対応」、「警戒避難体制の確立」、「有効な対策工法」等の開発・高度化を図る必要がある。そのためには、防災関係機関・研究機関が深層崩壊に関する情報を広く共有し連携していくことが求められる。また、深層崩壊の発生する可能性の高い地域における防災教育や地域防災を担う地方自治体職員に対する技術的支援等を積極的に実施するなど、地域の防災力向上に取り組んでいく必要があると考える。

【参考文献】

- 1) (社)砂防学会, 深層崩壊に関する基本事項に関わる検討委員会報告・提言, P1~27, 2012
- 2) 小山内ほか, 深層崩壊に関する基本事項の検討, 平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, P12~13, 2012
- 3) (独)土木研究所, 深層崩壊の発生の恐れのある溪流抽出マニュアル(案), 土木研究所資料第 4115 号, P1~P21, 2008
- 4) 国土交通省, 深層崩壊に関する全国マップについて, 記者発表資料, 2010
- 5) 国土交通省, 深層崩壊に関する溪流(小溪流)レベルの調査について, 記者発表資料, 2012
- 6) 水野ほか, 衛星 SAR 画像による大規模崩壊の緊急判読調査手法の実用化, 土木技術資料 54-10, P6~9, 2012
- 7) 内田ほか, 深層崩壊を引き起こした降雨の特徴, 平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, P332~333, 2012