

大規模土砂移動に伴う災害の特徴整理と 影響範囲の予測および対策に向けた課題

Estimation of potential areas affected by large-scale sediment movements and disaster mitigations for the large-scale sediment movements

今 泉 文 寿 ^{*1}	堤 大 三 ^{*2}	中 谷 加 奈 ^{*3}	権 田 豊 ^{*4}
Fumitoshi IMAIZUMI	Daizo TSUTSUMI	Kana NAKATANI	Yutaka GONDA
逢 坂 興 宏 ^{*1}	福 山 泰 治 郎 ^{*5}	宮 田 秀 介 ^{*2}	篠 原 慶 規 ^{*6}
Okiihiro OHSAKA	Taijiro FUKUYAMA	Shusuke MIYATA	Yoshinori SHINOHARA
水 野 秀 明 ^{*7}	原 田 紹 臣 ^{*8}	水 野 正 樹 ^{*9}	
Hideaki MIZUNO	Norio HARADA	Masaki MIZUNO	

1. はじめに

大規模な土砂移動に伴う災害を軽減するためには、大規模土砂移動の危険性の高いエリア、つまり「発生場」の予測と、土砂移動が起きた場合の「到達範囲」の予測を組み合わせ、土砂移動の「影響範囲」を推定し、そのうえで有効な対策を講じる必要がある。さらに到達範囲が広域にわたる場合、ハード対策とソフト対策の効率的な組み合わせが必要となる。

これまで国内外において、発生場の予測、および到達範囲の予測それぞれについて、様々な研究が行われてきており、またそれぞれに関する詳細なレビューが行われてきた(例えば、南部ら, 2003; Jakob and Hungr, 2005; 高橋, 2006; Takahashi, 2009; Lu and Godt, 2013)。その一方で、影響範囲の予測手法を検討するためには、発生場の予測と到達範囲の予測を含む広範囲にわたる研究を概観しようとする試みが必要である。加えて、有効な予測手法や対策の構築のためには、実際の災害事例の整理と上述した研究のレビューの双方に基づいて、手法の構築に向けた課題をとりまとめようとする試みが必要であろう。

そこで本研究では、今後の影響範囲の予測手法の構築に資するため、近年(2005年以降)の災害に関する調査結果をもとに災害の特徴をまとめた。あわせて既往の関連研究を広範囲にわたって俯瞰し、研究の位置付けを整理したうえで、有効な影響範囲予測手法の開発に向けた課題をまとめた。また、総合的な土砂対策の構築に向け、ハード・ソフト対策の課題をまとめた。関連研究は海外

でもなされており、多様な予測手法、対策が提案されているが、本総説では国内の手法、対策を中心にとりまとめた。

2. 大規模土砂移動の定義

土砂災害は表層崩壊、深層崩壊などの斜面上の土砂移動の発生プロセス、移動を開始した土砂の斜面や溪流上での移動プロセス、さらには河道閉塞・天然ダムの決壊といった土砂移動に付随して起きるプロセスが単発で、あるいは複合的に重なり起きるものである。土砂移動のタイプ(種類)が多様であることに加え、同一のタイプに分類される土砂移動現象であっても土砂量、移動距離、面積が数オーダーの幅を持っており、それにより被害の大きさが異なる。このため、適切な影響範囲の予測、さらには総合土砂対策の計画のためには、対象とする土砂移動現象を明確化する必要がある。そこで本章では、本総説で扱う土砂移動の定義を行う。

これまで国内外において、規模、土砂移動形態、要因等に注目した土砂移動現象の分類が数多く試みられてきた(例えば、Cruden and Varnes, 1996)。本総説では、「大規模な」土砂移動とは何かを明確にするため、規模に着目した分類を行い、あわせて土砂移動のタイプとの関連性についても論じる。土砂移動の規模を表す指標は大きく2つに大別される(図-1)。1つは土砂移動現象そのものの規模を表す指標であり(例えば、八反地, 2003; 戸邊ら, 2007; 清水, 2008)、もう1つは土砂移動に伴って発生する被害の規模を表す指標である(例えば、牛

*1 正会員 静岡大学農学部 Member, Faculty of Agriculture, Shizuoka University (imaizumu@shizuoka.ac.jp) *2 正会員 京都大学防災研究所 Member, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University *3 正会員 京都大学大学院農学研究科 Member, Graduate school of Agriculture, Kyoto University *4 正会員 新潟大学農学部 Member, Faculty of Agriculture, Niigata University *5 正会員 信州大学農学部 Member, Faculty of Agriculture, Shinshu University *6 正会員 宮崎大学農学部 Member, Faculty of Agriculture, University of Miyazaki *7 正会員 国立研究開発法人土木研究所 Member, Public Works Research Institute *8 正会員 三井共同建設コンサルタント株式会社 Member, Mitsui Consultants, Co., Ltd. *9 正会員 新潟大学災害・復興科学研究所 Member, Research Institute for Natural Hazards and Disaster Recovery, Niigata University

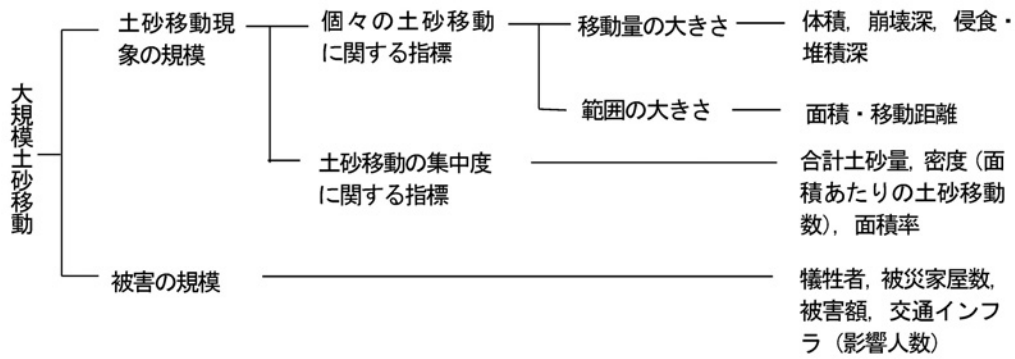


図-1 土砂移動・土砂災害の規模を表す指標

山, 2005)。前者は土砂移動という自然現象の規模により決定され、後者は土砂移動発生地域における居住者数やインフラの整備状況など、社会的な要因の関わりのもとに決定される。このうち土砂移動現象の規模に着目すると、さらに個々の移動土砂に関する指標と地域における土砂移動の集中度に関する指標の2つに分類することができる。個々の土砂移動に着目したものとしては、体積、崩壊深、侵食・堆積深など、土砂の移動量の大きさを表す指標、面積や移動距離など、範囲の大きさを表す指標が含まれる（八反地, 2003；清水, 2008）。これらの規模の大きさは、土砂移動現象のタイプに依存し、例えば、深層崩壊が関係する現象は個々の土砂移動規模が大きくなることが多く、表層崩壊が関係する現象は個々の土砂移動の規模が小さくなることが多い。一方、地域内での土砂移動の集中度を表すものとしては、密度（面積あたりの土砂移動数）、面積率などが含まれる（戸邊ら, 2007）。個々の土砂移動は小規模であっても、この集中度と関わる指標が高い場合、地域スケールで見ると大きな土砂移動量となる、あるいは特定地域に激甚な被害を及ぼす可能性がある。

本総説では、土砂移動の規模を表す指標（個々の土砂移動に関する指標および地域での集中度に関する指標）のいずれかが大きく、それにより被害の規模が大きくなるような現象を大規模土砂移動現象として検討対象とする。近年（2005～2014年）の主な土砂災害について、個々の土砂移動の規模および地域レベルの集中度に関する指標をもとに整理すると、図-2のようになる。既往の研究において報告されているように、土砂移動現象そのものに注目すると、現象の規模とその規模の土砂移動現象が発生する頻度には対応関係がある（Brardinoni and Church, 2004；Hunger et al., 2008；後藤, 2012）。その一方で、災害間の比較を行うと、同一の災害であっても様々な規模の現象が混在して発生する場合があること、地質や降雨パターンによって規模や集中度が変化することなどに起因し、規模と集中度は必ずしも対応関係にあるわけではないと考えられる。図-2によると、大規模土砂移動は大きく2つのグループに分類される。1つは2005年台風14号による耳川流域での土砂災害や2011

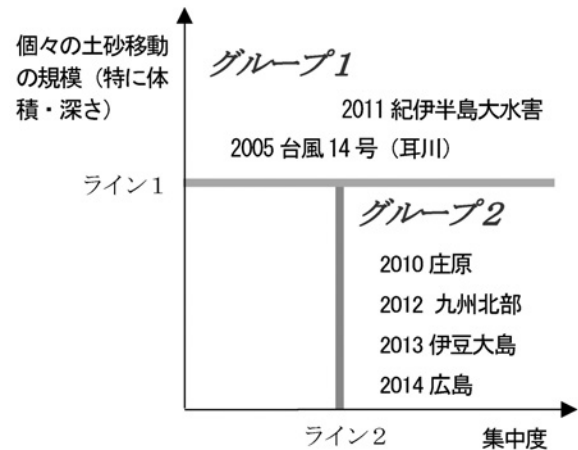


図-2 近年（2005～2014年）の土砂災害の分類

年台風12号による紀伊半島大水害であり（谷口ら, 2005；松村ら, 2011）、これらの災害では深層崩壊が発生し、個々の土砂移動の規模が大きいことが特徴であった（グループ1）。もう1つのグループは2010年の庄原土砂災害、2012年の九州北部豪雨や2013年の台風26号による伊豆大島土砂災害、2015年広島豪雨などであり（海堀ら, 2010；石川ら, 2014；牛山, 2014；海堀ら, 2014）、すべり面が比較的浅い（2m程度以下）表層崩壊や小渓流での土石流が同時多発的に発生することで引き起こされた災害である（グループ2）。個々の土砂移動の規模は必ずしも大きくはないが、特定の地域に集中的に表層崩壊・土石流が発生したため、地域に甚大な被害を及ぼした。

次に2つのグループの分類を決定する数値指標について整理する。深層崩壊の発生の有無をグループ1とグループ2を分ける目安とした場合、グループ1とグループ2の境界線の位置（図-2のライン1）は深層崩壊の規模の定義を参考にすべきであろう。深層崩壊の規模の定義は必ずしも統一されていない。深層崩壊研究会（2013）では面積1万m²以上、深さ10m以上を深層崩壊と定義している。砂防学会（2012）では、表層崩壊を深さ2m以内、深層崩壊をそれよりも深い崩壊としている。国土交通省は深層崩壊推定頻度マップの策定にあたり、崩壊土砂量が概ね10万m³以上、崩壊面積が1万m²以

上、崩壊深さが5 m以上の大規模な崩壊の過去の発生履歴を参考資料として用いている（後藤，2012）。本来、表層崩壊と深層崩壊の定義は、表土層が崩れるか基盤内部から崩れるかという現象論の違いに基づくものであり、山地での表土層の厚さが空間的に様でないことを考えると、1つの数値で両者を区別することは困難である。一般的な斜面の土層厚が0.5～2 m程度であることを考えると、深層崩壊と表層崩壊を分けるラインは砂防学会（2012）が定義する2 m付近に存在するといえる。その一方で、2 m付近にラインを設定した場合、土層厚が厚い場所での表層土の崩壊が少なからず深層崩壊と区分される。

本総説では、影響範囲の推定に向けた調査・解析手法、および対策の有効性に着目してグループ1とグループ2に分ける。基盤内部からの崩れであっても、比較的浅い場合（2～10 m程度）については表層崩壊と同様に、貫入試験等により地盤構造を調査することができる（鴨居，2007）。さらに深さ10 m以下の深層崩壊のほとんどは体積が20万 m^3 以下であり（例えば、八反地，2003）、砂防えん堤による土砂の捕捉も不可能ではない。以上より、グループ1とグループ2を分ける目安を、深層崩壊研究会（2013）が定義する深さ10 m（面積にして概ね10万 m^2 以上）と設定し、それよりも浅い深層崩壊は表層崩壊と一体的に扱う。崩積土や沖積層が厚く堆積する場所を除き、土層厚10 mを超える山腹はほとんど存在しないため、この10 mを超える崩壊はほぼ必ず深層崩壊に相当すると考えられる。

次に大規模土砂移動でない災害とグループ2を分けるライン2について考える。集中度の軸については、それが高い場合と低い場合で生起する現象の種類に大きな違いがないと考えられる。そのため、ライン2の設定方法は予測手法の選択に大きな影響を与えないことが推定される。本研究では特定地域に与える影響の甚大さを念頭におき、便宜的に「同一地区の複数個所において土砂移動が発生する現象」をライン2の目安とする。

2つのグループでは個々の土砂移動現象の規模が異なるため、必然的に土砂移動の影響範囲の推定手法、および土砂災害への対策が異なる。グループ1（以下、個々

の土砂移動規模の大きな現象による災害）については斜面の地下深くの地質構造や水文特性が深くかかわっており（例えば、地頭蘭・下川，1998；千木良，2006）、広域を対象とした場合、これらを直接的に調査することが困難である。そのため、入力データの不足により信頼のできるシミュレーションを行うことが困難であり、地形、地質等に基づく経験的手法を組み合わせることになる。グループ2（以下、集中的に発生する土砂移動による災害）は比較的浅い場所での土質・水文特性が関係しており（逢坂ら，1992；内田ら，2009）、特に火山地域など、地表面付近の土層構造が空間的に単純化できる地域では（石川ら，2014）、シミュレーションによる影響範囲の予測が有効であると考えられる。

実際には同一の災害で深層崩壊と集中的な表層崩壊や土石流の双方が発生することがある。このような災害の予測を行うためには、グループ1を対象とした予測手法とグループ2を対象とした予測手法の双方を行う必要があるだろう。

以下では影響範囲の推定手法と対策について、グループ1については紀伊半島大水害の事例を中心に、グループ2については伊豆大島、九州北部豪雨（阿蘇）、広島での災害を中心に、災害実態や研究調査事例を交えつつとりまとめた。

3. 深層崩壊等の個々の土砂移動規模の大きな現象の影響範囲の推定

深層崩壊等の個々の土砂移動規模の大きな現象の影響範囲の推定手法としては図-3aの流れが考えられる。図-3aの「①発生場の推定」方法としては、地形要素（山頂緩斜面、線状凹地・小崖地形、勾配等）（田村ら，2008；紀伊山地砂防事務所，2014b；砂防学会，2014a）、空中電磁法等により推察される内部構造（鈴木ら，2009）、水文の特徴（EC、湧水量、流出波形、実効雨量等）（砂防学会，2014a；紀伊山地砂防事務所，2014a）を活用したものが多い。このうち地形要素については航空レーザー測量による広域調査が可能であるが、地域によっては広範囲にわたり関連した地形が確認されることがあり（目代・千木良，2004）、地形因子のみでは危険斜面の特

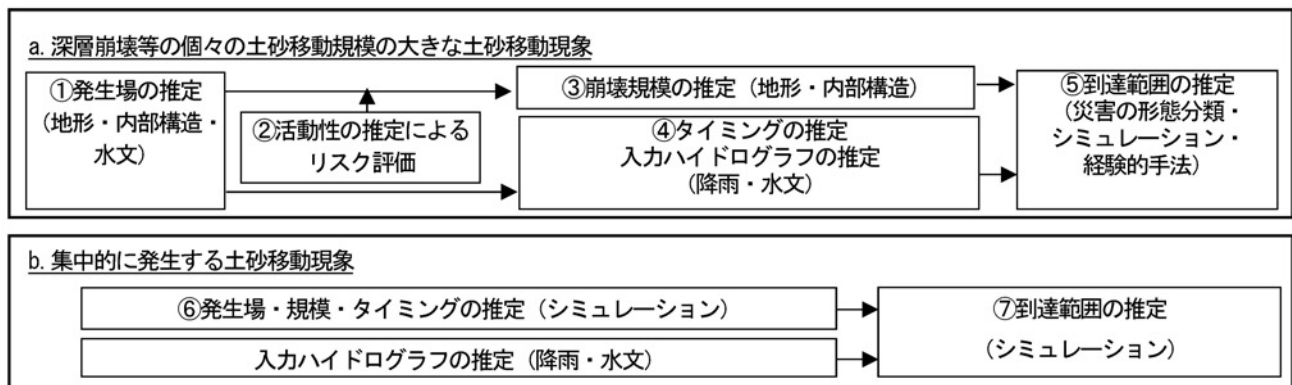


図-3 影響範囲の推定に向けたフロー図

定は難しいと考えられる。水文的特徴については広域を対象とした調査が難しい一方で、個々の斜面の危険性評価や崩壊タイミング（発生時刻）の推定に活用しようという試みがある（恩田ら，1999；地頭菌ら，2006）。そのため、「地形要素→内部構造→水文的特徴」の順に調査を進め、徐々に危険斜面を絞り込んでいくのが望ましいと考えられる。多くの発生場の推定手法に関する課題としては、まだ適用例、適用地域が少ないことが挙げられる。国土交通省の「深層崩壊推定頻度マップ」、あるいは田村ら（2008）に基づく「深層崩壊溪流（小流域）レベル評価マップ」は日本全国を対象として適用されているものの、その他の手法に関しては一部の地域を対象に検討・検証された手法が多く（例えば、砂防学会，2014 a），今後は他地域での危険度予測に活用できるかの検証が必要である。また、特に地形要素を活用した手法については、過去の斜面の変形を反映しており、必ずしも現在の活動性を反映していない可能性がある。そこで、図-3 aにある「②活動性の推定によるリスク評価」の実施が好ましい。斜面の活動性の推定は、対策の優先順位付けにも活用することができ、効果の高い対策の実施のために有効であると考えられる。活動性を推定する方法としては、現地踏査によるクラックの有無の調査、GNSS（全球測位衛星システム）を含めた各種測量が考えられるが、近年は広域を対象として斜面の活動性を調べられる、Lバンド干渉 SAR 解析による調査手法が開発されている（清水ら，2005；佐藤ら，2013；神山ら，2014）。GNSSを用いた現地観測結果との対比により、その有効性が確かめられつつある。その一方で、干渉 SAR 解析は、「周囲を平地で囲まれた独立峰の斜面」、「河川屈曲部に隣接する斜面」の地形において、斜面変位の不正解抽出が生じやすく、斜面変位有無の確認のために現地調査や現地計測が必要である。また、干渉 SAR 解析で推定される斜面の活動性と実際の深層崩壊の発生との対応関係については不明確な部分があるため、事例の蓄積による対応関係の検討が今後の課題である。

「⑤到達範囲の推定」を行うためには、「①発生場の推定」に加え、入力条件として土砂量（つまり「③崩壊規模の推定」）、河道へ土砂が供給される時刻（つまり崩壊の「④タイミングの推定」）、およびハイドログラフを与える必要がある。このうち「③崩壊規模の推定」については、地すべりで行われているように（上野ら，2001）、対象斜面の地形因子（斜面長等）により経験的に崩壊面積を推定できる可能性がある。

図-4 は、紀伊半島大水害時に発生した 49 個の深層崩壊について、深層崩壊の規模と地形因子を対比したものである。図-4 a は斜面長と崩壊面積を対比したものであり、両者には正の相関が見られる。さらに、斜面全体にわたり崩壊したもの（崩壊長/斜面長が 0.8 以上のもの）と斜面の一部が崩壊したもの（崩壊長/斜面長が 0.8 未満のもの）を分けてプロットすると、その関係性

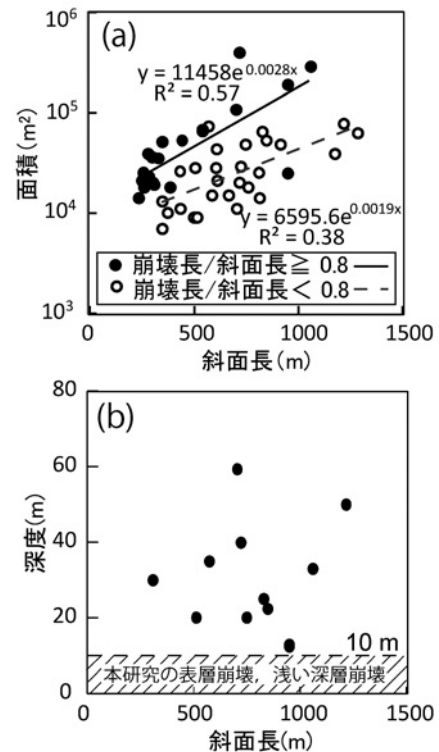


図-4 紀伊半島大水害時に発生した深層崩壊の規模と地形因子の対比。(a) 斜面長と面積，(b) 斜面長とすべり面の深度

はより明確になる。図-4 a の斜面全体にわたる崩壊のプロットはその斜面で発生しうる最大の崩壊の面積を示しており、かつ今後、崩壊長/斜面長あるいは崩壊源頭部の位置に関する経験的推定手法が得られれば、面積の推定精度をさらに向上できることが示唆される。それに対し、崩壊深は地形因子との関係性に乏しく（図-4 b），崩壊土砂量を直接的に地形因子から推定することは難しい。このため、①の内部構造に関する情報等から崩壊深を推定し、地形から推察される崩壊面積にそれを乗じる、あるいは地形から推察される崩壊面積に Guzzetti et al., (2009)に見られるような、崩壊面積-崩壊体積関係を適用するなどの方法による崩壊土砂量の推定が考えられる。

「④タイミングの推定」については、従来から組み込まれてきた累加雨量、時間雨量などの降雨指標を用いた推定手法がある（深層崩壊研究会，2013）。また小杉（2015）により、半減期の異なる 2 種類の実効雨量を組み合わせる既往最大値超過を評価する方法が提案されている。斜面湧水の継続的な電気伝導度計測によって深層崩壊危険斜面の抽出と同時に、そのタイミングをある程度同定できる可能性も示されている（砂防学会，2014 a）。しかしながら、土砂移動に関わる他の項目と同様、タイミングの推定に関する事例も限られており、事例の蓄積が必要である。

深層崩壊が発生すると、崩土の土石流化、河道閉塞、流木の発生など様々な付随した現象が起きる。これらを

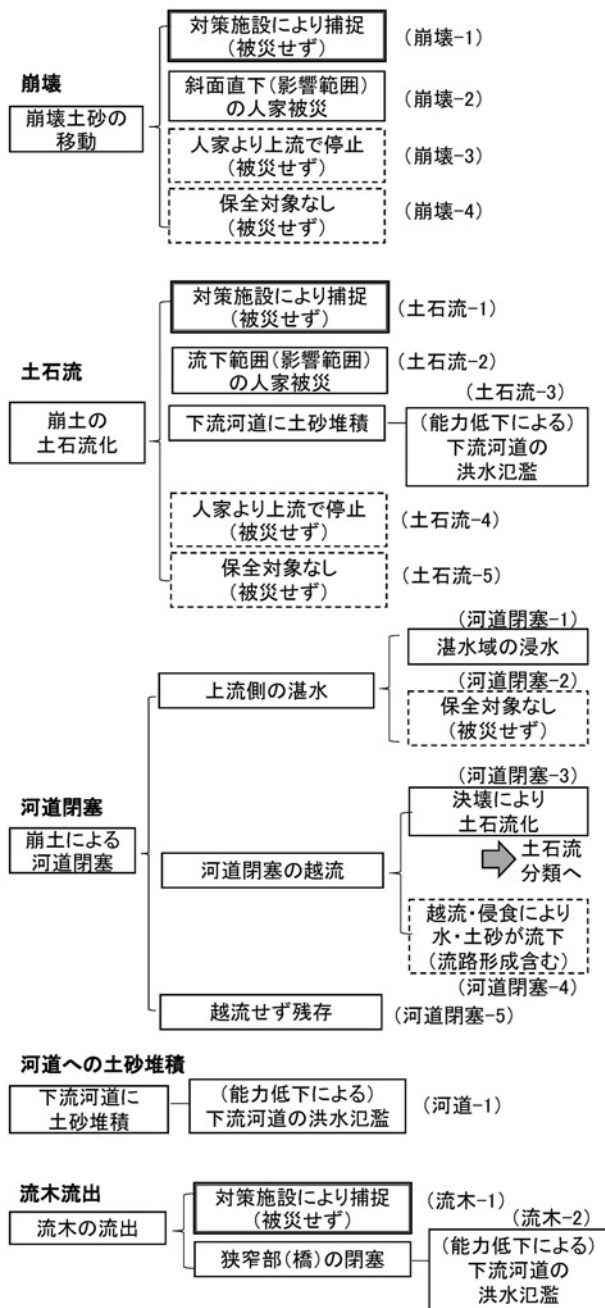


図-5 災害形態の分類方法

踏まえて影響範囲の推定を行うためには、「⑤到達範囲の推定」において、まず発生しうる災害の形態を整理する必要がある。紀伊半島大水害で見られたように、深層崩壊が発生すると、河道閉塞、土石流の発生などが複合的に発生することが多く（松村ら，2011），単純な階層分類では分類不能な事例が多く生じる。そこで新たに図-5に示すような整理手法を提案する。つまり、深層崩壊発生後に災害につながる代表的な5つの現象（大項目），すなわち崩壊土砂の移動（土石流も河道閉塞も発生せず），土石流の発生，河道閉塞，河道への土砂堆積，流木流出について，起こりうる災害の形態をまとめた。実際の災害は大項目のうちの1つ，あるいは複数が関係しておきため，災害事例に応じてそれらを直列的，あるいは並

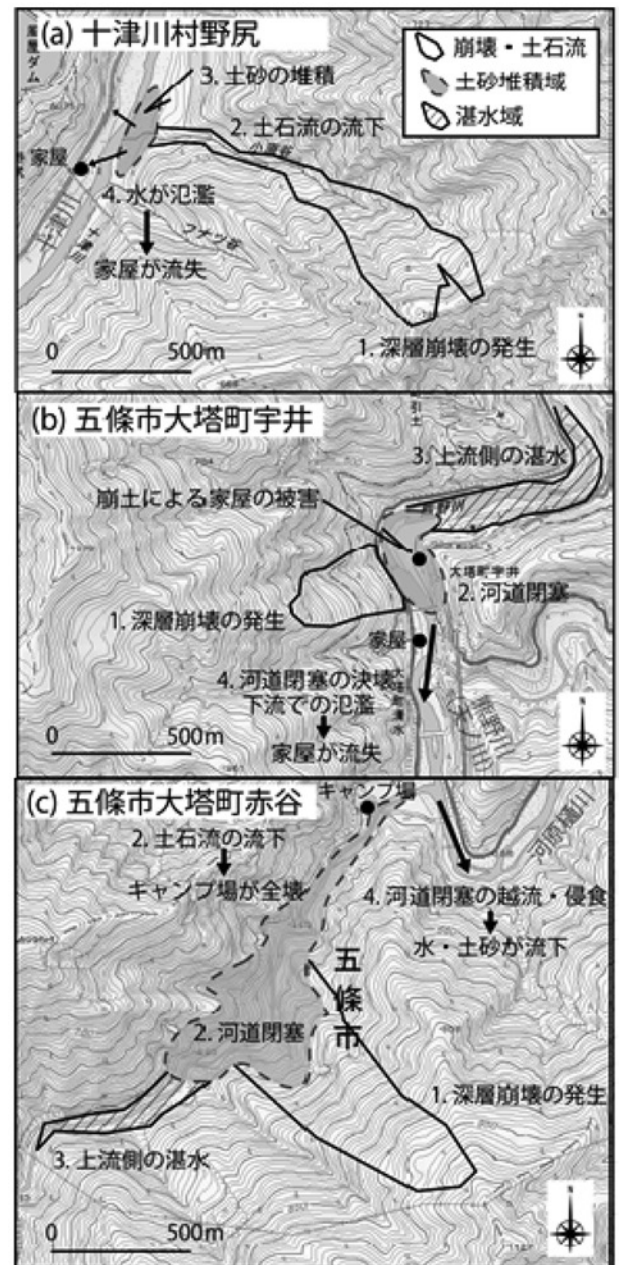
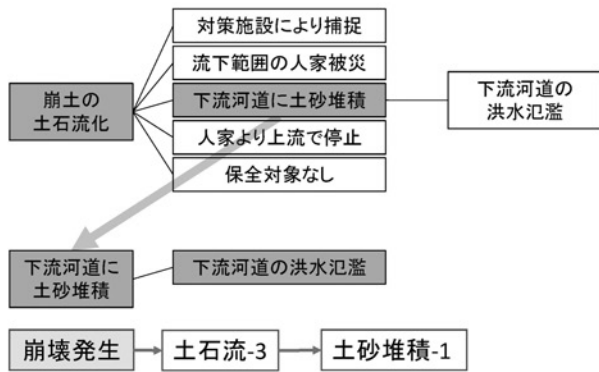


図-6 紀伊半島大水害における代表的な深層崩壊の発生状況と被災状況

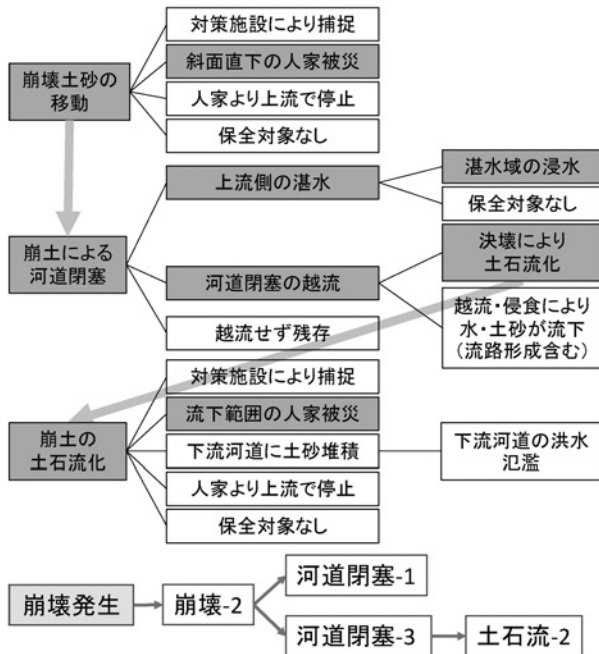
（背景の地図には国土地理院電子国土基本図を使用。土砂移動等の範囲は奈良県（2015）をもとに作成。数字は現象の発生順序を示す）

列的に繋げることで，災害の整理が可能となる。その上で，数値シミュレーションにより土砂，水，流木の到達範囲を推定することになる。

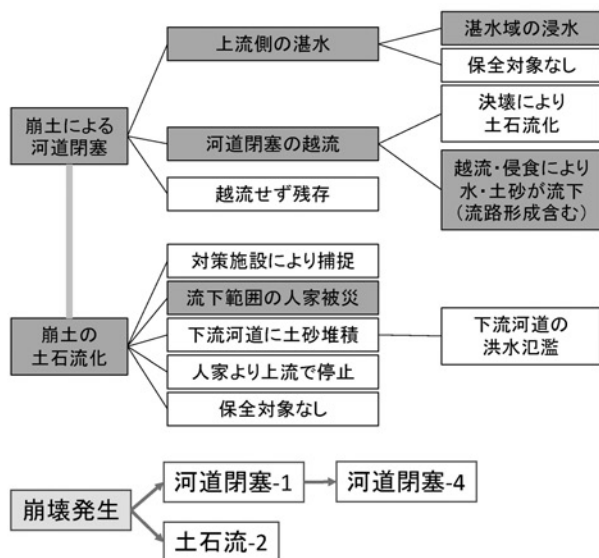
具体的な例として，図-6に示す3つの深層崩壊に伴う災害を分類したものを図-7に示す。図-7aは奈良県吉野郡十津川村野尻の災害形態を示している。この災害では崩土が土石流化して河道に土砂が堆積，これに伴い下流側で洪水氾濫が起きた（図-6a）。このケースは付随する現象が少なく，従来の階層分類でも分類が容易な事例であるといえる。図-7bは奈良県五條市大塔町宇井の災害形態を示している。この地区では崩壊土砂に



(a) 奈良県吉野郡十津川村野尻



(b) 奈良県五條市大塔町宇井



(c) 奈良県五條市大塔町赤谷

図-7 災害形態の分類例

よって人家が被災し、直下の河道が閉塞した。この閉塞により上流側で湛水し、浸水被害が発生した。さらに天然ダムの決壊による下流での氾濫・侵食により、下流では人家の流失、損壊が起きた(図-6b)。図-7cは奈良県五條市大塔町赤谷の災害形態である。この地区では、崩壊土砂が直下の河道を閉塞したが、一部の崩壊土砂は土石流となり下流の施設を被災させた。また、閉塞によって上流側で湛水し、閉塞土砂の表面を流水が越流した(図-6c)。その後の台風15号の際にガリが形成された。宇井、赤谷の事例は、様々な現象が複合的に発生したものであるために単純な階層分類では分類が困難であるが、本手法を用いれば分類・整理が可能である。

次に、それぞれの災害形態を対象とした到達範囲の推定方法について注目する。崩土が土石流化した場合の到達範囲の予測手法(「土石流」)としては、数値シミュレーションが有効であり、Hyper KANAKOのようなGUIを実装した汎用土石流シミュレータも開発されている(堀内ら, 2012)。深層崩壊の崩土の土石流化を対象としたシミュレーションも試みられており(江頭ら, 1998; 西口ら, 2011)。また、深層崩壊に伴う土石流に対するハード対策の効果をシミュレーションにより議論した事例も見られる(中谷ら, 2014)。通常、土石流シミュレーションは、発生域周辺の渓谷部では一次元で、下流側の土石流扇状地周辺では二次元で計算するが、これらの計算領域の設定により、予測される到達範囲が異なる。また、水の供給ハイドログラフ(深層崩壊の場合は崩土が流入する河川・溪流の流量)によっても、到達範囲が大きく影響される。これらの設定手法が今後の課題である。

河道閉塞が起きた場合の湛水域の予測、あるいは天然ダムが決壊した場合の影響評価(「河道閉塞」)には天然ダムの形状の予測が不可欠である。形状予測は、物理的考察に基づく方法と経験的手法の2つに大きく分かれる(高橋・匡, 1988; 原田ら, 2015)。天然ダムの形状は、特に地質の影響を受けて、地域ごとに差異がある可能性がある(原田ら, 2015)、様々な地域でのデータの蓄積を行い、予測手法の精度向上を行う必要があると考えられる。

河道閉塞が起きた場合(図-5の河道閉塞)の二次的な被害として、湛水域に崩土が流れ込むことによる段波の発生が考えられる。紀伊半島大水害時には、これにより十津川村長殿地区で大きな被害が発生した(松村ら, 2011)。このような被害による影響範囲を予測する手法としては二次元空間(鉛直方向と水平面上のある一方向)での質量保存則とナビエ・ストークス方程式を組み合わせた数理モデル(後藤ら, 2002)と二次元浅水流方程式を基礎方程式とした数理モデル(Mizuno and Ankai, 2013)があり、実際に計算を試みた事例もある(伊藤ら, 2014)。広範囲な領域を対象とし、かつ湾曲等局所的な地形を考慮しようとした場合は後者の手法が有効であると考えられる。このような、段波の発生により突発的かつ大規模

な水や土砂の移動が生じると、河床堆積物の厚さが急激に変化する可能性があるが、既往のモデルをそのまま適用できるかについては不明である。今後は河床堆積物の厚さの時間変化のプロセスを明らかにするとともに、それをふまえた数理モデルの開発が必要である。

土石流の発生や天然ダムの決壊等が起きると、下流河道において土砂堆積に伴い河床が上昇し、洪水が発生するリスクがある(「河道への土砂堆積」)。このような災害のリスク評価のためには「土石流」あるいは「河道閉塞」と連動した河床変動計算が必要となる。

大量の流木が発生すると(「流木流出」)、狭窄部(橋脚等の構造物を含む)の閉塞により、影響範囲が拡大する可能性がある。流木の流下やそれによる河道の閉塞を計算した事例としては、個別要素法を用いた渋谷ら(2011)の研究が挙げられる。上述の土石流の流下や、段波の発生と一体的に計算を行うためには、今後、二次元浅水方程式に流木に関する計算を組み込んでいく必要がある。

4. 表層崩壊等が集中的に発生する場合の影響範囲の推定

本章では表層崩壊等が集中的に発生することにより引き起こされる災害(グループ2)の影響範囲の推定手法についてとりまとめる。与えられた降雨条件下における小流域内(10 km²以下程度)での表層崩壊発生リスクを評価する場合は、土質条件の空間的不均一性を単純化したうえで、シミュレーションが行われることが多い(黒川ら, 2007; 執印ら, 2010)。その一方で、表層崩壊は深層崩壊と比較して現象が小さいことに起因し、実際には小さなスケール(数10 m以下)での土層厚等の空間的な分布がその発生に影響を及ぼす(内田ら, 2009)。そのため、発生箇所の特定を目的とした場合は、高密度の現地調査を要する。いずれにせよ、図-3bの「⑥発生場、規模、タイミングの予測」は、現地で採取した土質サンプルの室内試験や貫入試験により得られる土層構造をもとに、シミュレーションにより行われることが多い。具体的なモデルとしては、1. 飽和・不飽和浸透解析(例えば平松ら, 1990)、2. ブロック集合モデル(高橋・中川, 1986; Michiue and Fujita, 1990)、3. Stream tubeモデル(Wu and Sidle, 1995)と斜面安定解析を組み合わせた方法が挙げられる。

1. の飽和・不飽和浸透解析は以前から広く用いられている手法であるが、流域規模に対象を拡大し複数の斜面崩壊を三次元的に扱う解析は、計算負荷の観点からあまり現実的ではない。また、すべり面が未知である場合に三次元形状を探索する方法に課題が残る。

2. のブロック集合モデルについては、1. より計算負荷が少ないという利点を有する。その一方で、斜面安定解析の単位がメッシュごとに限定され、無限長斜面を仮定した解析を行わざるをえず、斜面崩壊発生予測や再現性には限度があるうえ、崩壊規模や崩壊深の推定は困難で

ある。

広域(流域単位)を対象に解析でき、かつ崩壊の規模予測を行える手法としては3. のStream tubeモデルに臨界滑り面による安定解析を組み合わせた手法が挙げられる。Stream tubeモデルとは、対象流域を流線で分割し、隣り合う2本の流線の間の領域をstream tubeと定義して、それぞれ単独のstream tubeに対して、個別に水移動の計算を行うものである。水移動解析の際は、stream tubeを流下方向にいくつかのelementに分割し、2. と同様の簡略化した解析手法を適用する(例えば、Wu and Sidle, 1995)。これに臨界滑り面による安定解析を組み合わせた崩壊発生予測を行った試みとしては孝子ら(2016)などがある。

図-3bの⑦到達範囲の推定については前述したHyper KANAKOのような土石流シミュレーションシステムを利用することが可能である。個々の土砂移動規模の大きな現象と同様に、一次元と二次元の計算領域をそれぞれ設定することになるが、特に火山性地域では谷の形状が明確でないことがある。一次元と二次元の計算領域の境界の位置によって計算結果が大きく異なることがあるため(中谷ら, 2014)、その設定手法が課題となっている。近年では、構造物や家屋の有無が到達範囲に及ぼす影響も検討されており、構造物の評価の有無により到達範囲が変化することが示されている(中谷ら, 2015)。

⑥の斜面安定解析による発生場、規模、タイミングの予測結果を入力データとして⑦のような土石流シミュレーションを行えば、影響範囲の推定が可能となる。その一方で、土砂量とともに重要な入力条件であるハイドログラフをどう設定するかによって、推定される影響範囲が大きく変化する。このため、ハイドログラフの設定方法は重要な課題である。また、近年、細粒土砂や流木多く含んだ土石流が被害を拡大させた事例が多く見られる(例えば、石川ら, 2014)。シミュレーションにおける細粒土砂の取り扱い方や流木の流下予測について、これまで多くの研究がなされているものの(新井・高橋, 1992; Hotta *et al.*, 2013; 渋谷ら, 2011)、実務においてそれらが広く活用される段階には至っておらず、今後も研究を進める必要がある。

5. ハード・ソフト対策の課題

5.1 深層崩壊等の個々の土砂移動規模が大きな現象

一般的な土砂災害対策では、砂防施設によるハード対策が主軸となる。一方、深層崩壊等の個々の土砂移動規模の大きな現象の場合、発生箇所の想定が困難であることから、ハード対策は困難であると考えられてきた。しかし、3章で示したように、近年の様々な技術の進展に伴い、深層崩壊に対するハード対策の道筋が示されつつある。深層崩壊に対するハード対策は、大きく深層崩壊前に実施する「事前の対策」と深層崩壊発生後に実施する「事後の対策」に区分される。

「事前の対策」としては、崩壊部に施設を配置し深層崩壊の発生を抑制する直接防止（原位置）対策と、下流河道部に施設を配置することにより深層崩壊発生後に土石流化した崩土を捕捉する対策が考えられる。前者については地下水排除工などが考えられるが、費用の面から課題が残り、実績は見られない。後者については、既存の砂防施設が深層崩壊に伴う土砂移動の一部を捕捉し、下流域の被害を軽減したという事例が複数報告されている（武澤ら，2009；森脇ら，1998）。ハード対策により深層崩壊による土石流の規模を減じ災害の規模を小さくするためには、施設が土石流によって破壊されないことが重要である。土石流が有する衝撃力は外力（土石流にはたらく重力の進行方向の成分）の影響を受けるため（浅井ら，2012），土石流化した崩土を捕捉する対策施設（砂防堰堤等）を外力の弱まる緩勾配区間（例えば、保全対象の直上）に設置することができれば、施設が破壊される可能性が低くなると考えられる。しかし、深層崩壊の発生箇所と保全対象が近接しているような場合には、砂防基本計画の土石流対策で計画される外力を超過する外力が施設に作用する可能性があり、このような超過外力に対しても施設が機能を損失しないようにするためには、施設の構造に関するさらなる研究・開発が必要である。

「事後の対策」としては、深層崩壊により河道閉塞が生じた場合に、河道閉塞が決壊しないよう施設を配置する対策が提案されている（桜井，2015）。中越地震、宮城岩手地震の際に実施され、その経験は紀伊半島水害の際の対策にも生かされている。しかし、その経験の蓄積は十分とはいえず、紀伊半島水害の後の台風による対策施設の一部損壊が生じている。今後も経験を積み重ね、安全に対策工事を実施する技術を開発すると同時に、対策工事中に河道閉塞が万が一決壊した場合に備えた場合のソフト対策を充実させることが必要である。

次にソフト対策について考える。ソフト対策を実施するにあたり重要となるのは、「いつ」、「どこで」、「どのような規模の」深層崩壊が発生し、「どのような挙動」をとるのかといった情報である。これらの情報を得るためには、3章で述べたような、発生場、規模、タイミング、到達範囲の推定を含む一連の予測を行い、それを警戒避難に生かしていく必要がある。

また、豪雨により深層崩壊が引き起こされる場合、一連の降雨イベントの最中に、様々な土砂災害が連鎖的に発生する複合土砂災害が引き起こされる可能性がある。紀伊半島大水害においても、深層崩壊が湛水池に突入して発生した段波により被害を受けた例（十津川長殿）、複数の深層崩壊が発生し河川に大量の土砂が流入、河川の流路が変更し洪水被害を受けた事例（天川村坪内、十津川村野尻）などが見られた（松村ら，2011）。また表層崩壊や土石流等により避難経路が寸断され避難ができなかったケースもある（藤田，2012）。深層崩壊に対する早期避難を実現するためには、深層崩壊自体の発生タ

イミングだけでなく、一連の災害の発生タイミングを考慮し、避難経路、避難のタイミングの選択が重要となる。山野井・藤田（2015）では、斜面崩壊モデルと土砂流出モデルを組み合わせたモデルにより、実際の災害イベントを対象とした流域スケールでの土砂移動が解析され、深層崩壊や土石流などの大規模な土砂移動現象に前後して発生する、降雨由来のハザード（強い雨による視界の悪化、道路の冠水）、水位由来のハザード（浸水、洪水、堤防の越流）、崩壊由来のハザード（小規模な崩壊、土砂の流出）等の小ハザード群が土砂災害警戒避難に及ぼす影響について考察されている。このような研究は始まったばかりであり、今後の進展が期待される。

5.2 表層崩壊等が集中的に発生する土砂移動現象

2012年九州北部豪雨、2013年伊豆大島土砂災害、2014年広島土砂災害では、治山構造物（谷止め）が破壊された事例はあるものの砂防施設がその機能を喪失する程破壊されることはなく、土石流対策の不透過型・透過型の砂防堰堤が土砂や流木を捕捉した（機能を発揮した）という事例が多く報告されている（石川ら，2014；海堀ら，2014）。これらは、ハード対策が、土砂災害の被害の抑制に一定の効果を発揮していることを意味している。しかし、ハード対策のための施設が期待されている機能を十分に発揮した場合であっても、流下してきた土砂や流木の容量が砂防堰堤のポケットの計画規模（計画土砂量）よりも著しく大きな場合は、止めきれずに下流への流下を許してしまう。また、砂防堰堤が土石流の先頭部の巨礫を捕捉することに成功した場合でも、土石流に含まれてきた細粒土砂や流れに浮遊しながら運ばれてきた流木が、堰堤を越えて下流へ流下する場合がある（石川ら，2014）。

従来の土石流・流木処理計画では、土石流危険渓流毎に谷の出口や保全対象の上流に計画基準点を設け、基準点より下流において災害が発生しないように、計画基準点の上流域で発生した土石流および土砂とともに流出する流木を砂防施設により処理するように計画が策定されている（国土技術政策総合研究所，2007）。この計画は、土石流危険渓流の流域内で発生した土石流が計画基準点を必ず通過することを暗黙のうちに想定している。しかし、伊豆大島土砂災害時には、計画基準点よりも上流で土石流が流域界を越流して砂防施設の配置されていない隣接する流域へ流出する、隣接する流域から砂防施設の設置地点よりも下流で流入するといった現象が生じている（石川ら，2014）。このような土石流の「想定外」の挙動に対しては砂防施設では対応することができず、ソフト対策も合わせた総合土砂対策が求められる。

効果的なソフト対策のためには、①住民に発生しうる土砂災害の種類や、それらの危険性の高い箇所をハザードマップ等により、あらかじめ周知すること、②危険性の高い箇所には土砂災害防止法により居住を制限すること、③住民が逃げる準備をし、実際に避難を開始するた

表-1 表層崩壊等が集中的に発生した地域でのソフト対策の課題

	2013 伊豆大島	2012 九州北部豪雨(阿蘇)	2015 広島
①ハザードマップ等による住民への災害危険性の周知	ハザードマップは作成されていたが、噴火による火山灰の堆積にもなって生じる土石流であり、大金沢で発生したような大規模かつ広範囲にわたる土砂災害の発生を想定していなかった。住民への周知も十分ではなかった。	ハザードマップは作成されていたが、住民への周知は十分ではなかった。	ハザードマップは作成されていたが、住民への周知の程度に、地域による差が見られた。
②土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域等の指定状況	土砂災害警戒区域等は平成 25 年度現在未指定。	土砂災害防止法による土砂災害特別警戒区域の指定が完了していない。指定区域外で災害が発生。	土砂災害防止法による土砂災害特別警戒区域の指定が完了していない。被災地域の大部分が指定区域外。
③避難勧告等の発令状況	大雨警報、土砂災害警戒情報は発令されたが、避難準備、避難勧告、避難指示等の警戒避難情報は発令されなかった。	大雨警報、土砂災害警戒情報に基づき、警戒避難情報は発令された。しかし、災害発生後に発令された地域がある。深夜や豪雨時に発令されたため避難が難しかった等、発令の時期に問題があった。	大雨警報、土砂災害警戒情報に基づき、避難勧告、避難指示等の警戒避難情報は発令されたが、土砂災害発生後であった。仮に避難勧告が土砂災害警戒情報の直後に行われていたとしても、深夜・豪雨時の安全な避難は不可能であったと考えられる。
④それらの情報についての住民の理解の程度	警戒避難情報は発令されなかった。	警戒避難情報は発令されたが、住民の防災情報に関する意識が低く、十分な活用ができなかった。	警戒避難情報は発令された。住民の防災情報に関する意識が高い地域では、警戒避難情報の発令前に自主的に避難が行われた。意識の低い地域では、警戒避難情報発令後も避難を行わなかった。
参考資料	伊豆大島土砂災害対策検討委員会 (2014)	阿蘇地域土砂災害対策検討委員会 (2013)	砂防学会 (2014 b, 2014 c, 2015), 海堀ら (2014)

めの情報を適切なタイミングで提供すること、さらに④それらの情報を住民が理解し行動することが必要である。近年発生した土砂災害である伊豆大島土砂災害、九州北部豪雨(阿蘇)、広島土砂災害の事例を見ると、前述の①～④それぞれに課題が存在していた(表-1)。今後は行政側が①～③を押し進めていくとともに、啓発活動によって住民側が③、④を実践できるようにする必要がある。

6. おわりに

本総説で示したように、影響範囲の推定は、これまでに提案された様々な手法を組み合わせる行うことになる。しかしながら、3章および4章で示したように、それぞれの手法の中には未だ課題が残るもの、あるいは適用事例が乏しいものが見られる。さらには、ハード対策、ソフト対策を組み合わせた総合土砂対策の実施のためには、適切な影響範囲の推定が不可欠である。今後、土砂災害の軽減のためには、これらの課題をひとつひとつ解決をしていく必要がある。これらの課題を解決するためには、様々な手法、知見の融合が必要であり、様々な専門の研究者・実務者が解決に向けて協力していくことが望まれる。

謝 辞

本研究は(公社)砂防学会が平成 25～27 年度にかけて一般財団法人砂防・地すべり技術センターからの受託研究事業として行った「大規模土砂移動の影響範囲の予測

とその対応手法の整理」の一部をとりまとめたものである。研究を実施するに際して、一般財団法人砂防・地すべり技術センターの関係各位、および砂防学会受託研究委員会委員各位から研究の進め方のアドバイスを含め様々な御指導を頂いた。本研究の資料収集および災害調査においては国土交通省九州地方整備局、紀伊山地砂防事務所、東京都、熊本県、福岡県、大分県、熊本県阿蘇市、東京都大島町など都道府県や市町村の関係部署や事務所に多大なるご支援とご配慮を頂いた。ここに付記して感謝いたします。

引用文献

- 新井宗之・高橋保 (1992)：泥流型土石流の氾濫堆積シミュレーション，水工学論文集，Vol. 36，p. 227-234
 浅井光輝・別府万寿博・石川信隆・眞鍋慶生・斉藤展・丹羽一邦 (2012)：数値流体シミュレーションによる流体衝撃力評価に関する基礎的研究，構造工学論文集 A, Vol. 58 A，p. 1021-1028
 阿蘇地域土砂災害対策検討委員会 (2013)：阿蘇地域土砂災害対策検討委員会報告書，http://www.pref.kumamoto.jp/kiji_6973.html，参照 2016-06-20
 Brardinoni, F. and Church, M. (2004)：Representing the landslide magnitude-frequency relation：Capilano River basin, British Columbia, Earth Surface Processes and Landforms, 29, p. 115-124
 千木良雅弘 (2006)：地すべり・崩壊の発生場所予測－地質と地形からみた技術の現状と今後の展開－，土木学会論文集 C, Vol. 62, No. 4, p. 722-735

- Cruden, D. M. and Varnes, D. J. (1996): Landslide types and processes. In Special Report 247: Landslides: Investigation and Mitigation, Transportation Research Board, Washington D. C..
- 江頭進治・本田尚正・宮本邦明 (1998): 姫川支川蒲原沢土石流のシミュレーション, 水工学論文集, Vol. 42, p. 919-924
- 藤田正治 (2012): 深層崩壊を伴う複合土砂災害とその対策, 第44回(社)砂防学会シンポジウム講演集, 深層崩壊による災害の実態と軽減手法のあり方, p. 45-60
- 後藤宏二 (2012): 深層崩壊～その実態と対応～, 平成24年度国総研資料, No. 699, p. 95-112
- 後藤仁志・林稔・酒井哲郎 (2002): 固液二相流型粒子法による大規模土砂崩壊に伴う水面波の発生過程の数値解析, 土木学会論文集, No. 719, II-61, p. 31-45
- Guzzetti F., Ardizzone F., Cardinali M., Rossi M. and Valigi D. (2009): Landslide volume and landslide mobilization rate in Umbria, central Italy. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 279, p. 222-229
- 原田紹臣・小杉賢一朗・里深好文・水山高久 (2015): 地形や地質の違いが天然ダムの堆積形状に与える影響, 土木学会論文集 B 1 (水工学), 71/4, p. I_1267-I_1272
- 八反地剛 (2003): 降雨を起因とする深層崩壊の特徴, 砂防学会誌, Vol. 55, No. 6, p. 74-77
- 平松晋也・水山高久・石川芳治 (1990): 雨水の浸透・流下過程を考慮した表層崩壊発生予測手法に関する研究, 砂防学会誌, Vol. 43, No. 1, p. 5-15
- 堀内成郎・岩浪英二・中谷加奈・里深好文・水山高久 (2012): LP データを活用した土石流シミュレーションシステム「Hyper KANAKO」の開発, 砂防学会誌, Vol. 64, No. 6, p. 25-31
- Hotta N., Kaneko, T., Iwata, T. and Nishimoto, H. (2013): Influence of fine sediment on the fluidity of debris flows, Journal of Mountain Science, 10, p. 233-238
- Hungr. O., McDougall, S., Wise, M. and Cullen M. (2008): Magnitude-frequency relationships of debris flows and debris avalanches in relation to slope relief, Geomorphology, Vol. 96, p. 355-365
- 石川芳治・池田曉彦・柏原佳明・牛山素行・林真一郎・森田耕司・飛岡哲之・小野寺智久・宮田直樹・西尾陽介・小川洋・鈴木崇・岩佐直人・青木規・池田武穂 (2014): 2013年10月16日台風26号による伊豆大島土砂災害, 砂防学会誌, Vol. 66, No. 5, p. 61-72
- 伊藤英恵・竹林洋史・梶原哲郎・藤田正治・富田邦裕 (2014): 山地蛇行河川における崩土の河川突入による段波の伝播特性, 土木学会論文集 B 1 (水工学), Vol. 70, No. 4, p. I_1033-I_1038
- 伊豆大島土砂災害対策検討委員会 (2014): 伊豆大島土砂災害対策検討委員会報告書, <http://www.kensetsu.metro.tokyo.jp/kasen/ooshima/final/houkoku.pdf>, 参照 2016-06-20
- Jakob, M., Hungr, O. (2005): Debris-flow Hazards and Related Phenomena, Springer, Berlin Heidelberg, 739 pp.
- 地頭蘭隆・下川悦郎 (1996): 1997年鹿児島県出水市針原川流域で発生した深層崩壊の水文地形学的検討, 砂防学会誌, Vol. 51, No. 4, p. 21-26
- 地頭蘭隆・下川悦郎・寺本行芳 (2006): 深層崩壊発生場予測法の提案 鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして, 砂防学会誌, Vol. 59, No. 2, p. 5-12
- 海堀正博・石川芳治・里深好文・松村和樹・中谷加奈・長谷川祐治・松本直樹・高原晃宙・福塚康三郎・吉野弘祐・長野英次・福田真・中野陽子・島田徹・堀大一郎・西川友章 (2014): 2014年8月20日に広島市で発生した集中豪雨に伴う土砂災害, 砂防学会誌, No. 67, Vol. 4, p. 49-59
- 海堀正博・杉原成満・中井真司・荒木義則・山越隆雄・林真一郎・山下祐一 (2010): 2010年7月16日に発生した広島県庄原市の土砂災害の緊急調査報告, 砂防学会誌, Vol. 63, No. 4, p. 30-27
- 神山嬢子・江川真史・水野正樹・國友優 (2015): 干渉 SAR 解析による斜面の微小変動の把握, 土木技術資料, Vol. 57, No. 5, p. 14-17
- 鴨井幸彦 (2007): すべり面判定における標準貫入試験の効用ー新潟県における地すべりを例としてー, 日本地すべり学会誌, Vol. 44, No. 1, p. 50-56
- 紀伊山地砂防事務所 (2014 a): 平成25年度深層崩壊対策水文等調査業務報告書, 国土防災技術株式会社
- 紀伊山地砂防事務所 (2014 b): 新宮川流域他大規模崩壊リスク調査業務報告書, アジア航測株式会社
- 国土技術政策総合研究所 (2007): 砂防基本計画策定指針(土石流・流木対策編)解説, 国土技術政策総合研究所資料第364号, 74 pp.
- 小杉賢一朗 (2015): 斜面崩壊の誘因となった降雨の評価手法, 砂防学会誌, Vol. 67, No. 5, p. 12-23
- 孝子綸図・山野井一輝・堤大三・藤田正治・和田孝志 (2016): TOPOTUBEによる地形分割を用いた表層崩壊予測と崩壊土砂の流下モデル, 平成28年度砂防学会発表会概要集 A, p. 96-97
- 黒川潮・阿部和時・大丸裕武・松浦純生 (2007): 物理則モデルによる表層崩壊危険度評価, 日本地すべり学会誌, Vol. 43, No. 6, p. 351-355
- Lu, N. and Godt, W. (2013): Hillslope hydrology and stability, Cambridge University Press, New Yourk, 437 pp.
- 松村和樹・藤田正治・山田孝・権田豊・沼本晋也・堤大三・中谷加奈・今泉文寿・島田徹, 海堀正博・鈴木浩二・徳永博・柏原佳明・長野英次・横山修・鈴木拓郎・武澤永純・大野亮一・長山孝彦・池島剛・土屋智 (2011): 2011年9月台風12号による紀伊半島で発生した土砂災害, 砂防学会誌, Vol. 64, No. 5, p. 43-53
- Michiue, M. and Fujita, M. (1990): Method for Predicting Slope Failure, Journal of Natural Disaster Science, Vol. 12, No. 1, p. 49-62
- Mizuno, H. and Ankai, T. (2013): Surge Triggered by Debris Flow Plunging into River, The 4th International Workshop on Multimodal Sediment Disaster, p. 51-56
- 目代邦康・千木良雅弘 (2004): 赤石山脈南部, 大谷崩から山伏にかけての山体重力変形地形, Vol. 77, No. 2, p. 55-76
- 森脇寛・佐藤照子・千葉長 (1998): 1997年7月鹿児島県出水市針原川土石流災害調査報告, 防災科学研究所主要災害調査 第35号, 69 pp.
- 中谷加奈・小杉恵・里深好文・水山高久 (2015): 扇状地における家屋の存在が土石流の氾濫・堆積に及ぼす影響ー2013年10月伊豆大島土砂災害を対象としてー, 自然災害科学, Vol. 34, 特別号, p. 77-86
- 中谷加奈・美土路哲也・堀内成郎・里深好文・水山高久 (2014): 土石流数値シミュレーションの一次元計算領域と二次元計算領域の設定方法の検討ーGISと連携したHyper KANAKO システムを活用してー, 自然災害科学, Vol. 33, 特別号, p. 13-26
- 南部光広・武石朗・沖村孝 (2003): 豪雨時における斜面崩壊のメカニズムと危険度予測 4. 危険度の高い斜面抽出法 (その1), 土と基礎, No. 51, Vol. 10, p. 53-58
- 奈良県 (2015): 紀伊半島土砂災害大規模土砂災害アーカイブ, <http://www.3.pref.nara.jp/doshasaigai/saboarchive/3/>, 参照 2017-01-20

- 西口幸希・内田太郎・石塚忠範・里深好文・中谷加奈 (2011)：細粒土砂の挙動に着目した大規模土石流の流下過程に関する数値シミュレーションー深層崩壊に起因する土石流への適用ー, 砂防学会誌, Vol. 64, No. 3, p. 11-20
- 恩田裕一・小松陽介・辻村真貴・藤原淳一 (1999)：降雨流出ピークの遅れ時間の違いからみた崩壊発生時刻予知の可能性, 砂防学会誌, Vol. 51, No. 5, p. 48-52
- 逢坂興宏・田村毅・窪田順平・塚本良則 (1992)：花崗岩斜面における土層構造の発達過程に関する研究, 砂防学会誌, Vol. 5, No. 3, p. 3-12
- 砂防学会 (2012)：深層崩壊に関する基本事項に係わる検討委員会報告・提言, JSECE Publication No. 65
- 砂防学会 (2014 a)：深層崩壊の発生危険斜面抽出手法および避難基準策定手法の開発, 河川砂防技術研究開発制度報告書
- 砂防学会 (2014 b)：広島市の大規模土砂災害に関する砂防学会緊急調査に基づく提言, http://www.jsece.or.jp/survey/20140824/20150321_hiroshima_teigen.pdf, 参照 2016-06-20
- 砂防学会 (2014 c)：2014 年 8 月広島大規模土砂災害緊急調査報告書, http://www.jsece.or.jp/survey/20140824/201408_hiroshima_report6.pdf, 参照 2016-06-20
- 砂防学会 (2015)：2014 年広島土砂災害から学ぶ大規模土石流災害の予測と対策, 平成 27 年度(公社)砂防学会講習会テキスト, 97 pp.
- 桜井亘 (2015)：大規模河道閉塞における対策工の計画に関する研究, 京都大学博士論文
- 佐藤浩・谷隆基・中埜貴元・小荒井衛・岩橋純子・宇根寛 (2013)：SAR 干渉画像で検出された地すべり域における詳細野外調査の結果, 日本地すべり学会誌, No. 50, Vol. 1, p. 18-23
- 渋谷一・香月智・大隅久・石川信隆・水山高久 (2011)：円柱モデル個別要素法による捕捉工の流木捕捉解析, 土木学会論文集 A 2 (応用力学), Vol. 67, No. 1, p. 113-132
- 清水孝一・山越隆雄・小山内信智・福嶋彩・三尾有年 (2005)：合成開口レーダの差分干渉処理技術による地すべり地検知の可能性について, 日本地すべり学会誌, Vol. 42, No. 2, p. 312-317
- 清水収 (2008)：大規模土砂災害の発生履歴と土砂移動規模の評価ー宮崎県が多雨地域の事例ー, 砂防学会誌, Vol. 61, No. 8, p. 36-42
- 深層崩壊研究会 (2013)：深層崩壊のメカニズム解明に関する現状報告, <http://shinsouhoukai.sakura.ne.jp/top.html>, 参照 2016-06-20
- 執印康裕・松英恵吾・有賀一広・田坂聡明・堀田紀文 (2010)：人工林を対象とした分布型表層崩壊モデルの適用について, 日本緑化工学会誌, Vol. 36, No. 1, p. 27-32
- 鈴木隆司・内田太郎・田村圭司 (2009)：深層崩壊斜面の特定に向けた地盤構造調査法, 土木技術資料, Vol. 51, No. 7, p. 8-13
- 武澤永純・内田太郎・鈴木隆司・田村圭司 (2009)：鹿児島県船石川で発生した深層崩壊に起因する土石流の推定, 砂防学会誌, Vol. 62, No. 2, p. 21-28
- 高橋保 (2006)：土砂流出現象と土砂害対策, 近未来社, 420 pp.
- Takahashi, T. (2009)：Review of Japanese Debris Flow Research, Journal of Erosion Control Engineering, No. 2, Vol. 1, p. 1-14
- 高橋保・匡尚富 (1988)：天然ダムの決壊による土石流の規模に関する研究, 京都大学防災研年報, Vol. 31, B-2, p. 601-615
- 高橋保・中川一 (1986)：豪雨性表層崩壊の発生とその生産土砂量の予測, 水理講演会論文集, Vol. 30, p. 199-204
- 田村圭司・内田太郎・鈴木隆司・寺田秀樹・栗原淳一 (2008)：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, No. 4115
- 谷口義信・内田太郎・大村寛・落合博貴・海堀正博・久保田哲也・笹原克夫・地頭蘭隆・清水収・下川悦郎・寺田秀樹・寺本行芳・日浦啓全・吉田真也 (2005)：2005 年 9 月台風 14 号による土砂災害, 砂防学会誌, Vol. 58, No. 4, p. 46-53
- 戸邊勇人, 千木良雅弘, 土志田正二 (2007)：愛知県旧小原村の風化花崗岩類における崩壊発生密度の岩相間での比較, 応用地質, Vol. 48, No. 2, p. 66-79
- 内田太郎・盛伸行・田村圭司・寺田秀樹・瀧口茂隆・亀江幸二 (2009)：場の条件の設定手法が表層崩壊発生箇所の予測に及ぼす影響, 砂防学会誌, Vol. 62, No. 1, p. 23-31
- 上野将司 (2001)：地すべりの形状と規模を規制する地形・地質要因の検討, 日本地すべり学会誌, Vol. 38, No. 2, p. 105-114
- 牛山素行 (2005)：2004 年台風 23 号による人的被害の特徴, 自然災害科学, Vol. 24, No. 3, p. 257-265
- 牛山素行 (2014)：2003 年 7 月 19 日～21 日の九州における豪雨災害の特徴, 自然災害科学, No. 22, No. 4, p. 373-385
- Wu, W. and Sidle, R. C. (1995)：A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Basins, Water Resources Research, Vol. 31, No. 8, p. 2097-2110
- 山野井一輝・藤田正治 (2015)：大規模な土砂生産および洪水後の土砂管理に関する研究, 土木学会論文集 B 1 (水工学), Vol. 71, No. 4, p. I_961-I_966

(Received 1 July 2016 ; Accepted 31 January 2017)