

◆ 報 文 ◆

豪雨を誘因とする深層崩壊発生箇所の特徴と
その抽出手法について

鈴木隆司* 栗原淳一** 桜井 亘*** 酒井直樹****

1. はじめに

近年、台風の襲来や前線に伴う集中豪雨によって、深層崩壊に起因する土砂災害の発生が目立っている。例えば、1997年の鹿児島県出水市針原川（崩壊土砂量約16万 m^3 ）、2003年の熊本県水俣市集川（同約10万 m^3 ）、2005年の宮崎県宮崎市田野町別府田野川（右支溪の崩壊土砂量が約60万 m^3 ）などである。針原川の崩壊以前にも、四国から九州にわたる西南日本外帯（四万十帯や秩父帯などの分布区域）で深層崩壊が発生している^{1),2)}。深層崩壊に共通する特徴は、斜面の構成物質が厚くかつ不安定な状態にあって、崩壊の発生には深層地下水の挙動が大きく関わり、崩壊面が深くなっていることである³⁾。土砂災害としての特徴は、崩壊土砂量が 10^5m^3 以上に及ぶため、大規模な土石流の発生や崩壊に伴う河道閉塞等が生じ、被害が甚大になる場合が多いことである。

深層崩壊の発生場所を予測するための調査・研究は過去にも行われており（例えば、羽田野⁴⁾、岩松ら¹⁾、寺戸²⁾）、最近では深層崩壊の発生危険区域を事前に抽出する手法の提案⁵⁾も検討されている。深層崩壊に関わる要因は複雑であり、崩壊発生危険箇所やその規模などの予測に必要なデータの蓄積も十分ではないこともあって、抽出手法の確立までには至っていないというのが現状である。（独）土木研究所 火山・土石流チームにおいても、1999年から2002年にかけて深層崩壊のおそれのある溪流の抽出手法素案（以下「抽出素案」という。）を検討しているが、抽出素案を作成するために取り上げた崩壊事例数が少なく、手法としては確立途上であった。一方、近年の深層崩壊の頻発化を踏まえ、平成17年12月には国土交通省の「大規模降雨災害対策検討会」より深層崩壊のような大規模斜面崩壊の危険箇所を抽出する調査手法を検討する旨の提言がなされており、深層崩壊の危険箇所を把握する抽出手法の確立は強く望まれているところである。

以上のように、当チームでは過去に発生した深

層崩壊の地形・地質的な特徴から発生危険箇所を抽出する手法の検討を進めてきているところであり、本報は次の2点について調査・解析した成果をまとめたものである。なお、対象としている現象は豪雨に起因する深層崩壊に限っている。

- (1) 抽出素案で取り上げた抽出指標と深層崩壊の関わりを概説し、最近発生した深層崩壊箇所（表-1に挙げた12地区18箇所）の地形・地質等の特徴を調査した結果を加え、抽出素案に採用されている項目の妥当性（適合度）を評価した。
- (2) 2005年9月の台風14号で宮崎県鰐塚山周辺に発生した深層崩壊地を対象に、崩壊発生前の地形図や空中写真等を用いて微地形解析を行いながら抽出作業を実施し、抽出素案の適用性を検証した。また、深層崩壊の特徴と言われる降雨ピークと流出ピークのずれについても若干の考察を行った。

2. 深層崩壊の定義

「改訂 砂防用語集」（社）砂防学会 編⁶⁾では、

表-1 深層崩壊の事例（発生年月順）

崩壊発生地区	流域名・溪流（箇所）名	発生年月と誘因
1. 新潟県妙高市	①白田切川	1979.5 融雪
2. 長野県須坂市	②宇原川	1981.8 豪雨（台風）
3. 長野県小谷村	③姫川支川中谷川 （左支溪十二沢）	1995.7 豪雨（前線）
4. 長野県小谷村 新潟県糸魚川市	④姫川左支溪蒲原沢	1996.12 降雨、融雪
5. 長野県小谷村	⑤姫川支川浦川	1997.4 融雪
6. 鹿児島県出水市	⑥針原川	1997.7 豪雨（前線）
7. 熊本県水俣市	⑦宝河内川右支溪集川	2003.7 豪雨（前線）
8. 徳島県那賀町 （旧木沢村）	坂州木頭川（⑧大用地、 ⑨阿津江）	2004.8 豪雨（台風）
9. 三重県大台町 （旧宮川村）	宮川支川⑩唐櫃谷、 ⑪春日谷、⑫始神谷	2004.9 豪雨（台風）
10. 宮崎県宮崎市 （旧田野町）	清武川支川⑬別府田野 川、⑭片井野川	2005.9 豪雨（台風）
11. 宮崎県都城市 （旧山之口町）	大淀川支川⑮境川、 ⑯七瀬谷川	2005.9 豪雨（台風）
12. 宮崎県美郷町	耳川（塚原ダム周辺） ⑰野々尾、⑱松尾	2005.9 豪雨（台風）

※ 1.~6.は、かつて抽出素案作成時に調査対象とした崩壊事例。

「深層崩壊は、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も深部で発生し、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のこと。地質構造などが深く関係し、中・古生層地帯でしばしば見られる。豪雨時だけでなく、豪雨後の地下水挙動や比較的規模の大きな地震動によって発生することもある。」と解説している。なお同用語集では、表層崩壊の崩壊深を表層土と基盤層の境界部までの0.5～2.0m程度としている。

このことを踏まえて、本報では「崩壊土砂量が 10^5m^3 以上、かつ崩壊深が表層土に加えて基盤岩も含めて概ね5m以上に及ぶ現象」を深層崩壊として扱うことにする。

3. 抽出素案の概要と妥当性の評価

以下に記す抽出素案は、針原川や蒲原沢などの深層崩壊事例（表-1の1～6.）を基に、深層崩壊の発生に関連する地形・地質特性および水理水文特性を解析し、それらを基にまとめたものである。抽出素案の概要を図-1に示す。

3.1 抽出手順

抽出手順は大きく2つに分かれている。

第1段階は、深層崩壊の誘因となる地下水を多量に貯留する可能性のある区域という観点から、マクロな視点（1/20万程度の縮尺レベル）で危険区域を抽出（概ね数 km^2 ～数 10km^2 程度）するもので、机上調査により行う。

第2段階は、第1段階で抽出された危険区域から、地下水の貯留・湧出や厚い崩壊材料の存在に関連する地質や地形の特性に着目し、より大縮尺のミクロな視点（1/2.5万程度の縮尺レベル）で危険渓流を抽出するものである。机上調査のほか、現地において地形・地質調査を実施するとともに水理・水文調査を行うこととしている。なお、抽出素案の検討は現在も継続して行っており、ここで提示した手法は確定したものではないことを注記しておく。

次に、主な抽出項目と深層崩壊発生の関わりについて解説する。

3.2 マクロな危険区域の抽出のための調査項目

3.2.1 地質に関係する項目

抽出素案において、火山岩分布区域を深層崩壊のおそれがある区域として抽出指標に採用した理由は、当時は針原川や集川など火山地域で深層崩壊が連続して発生したことから、これらの区域では溶岩と火山砕屑物が互層をなし、深部まで不安

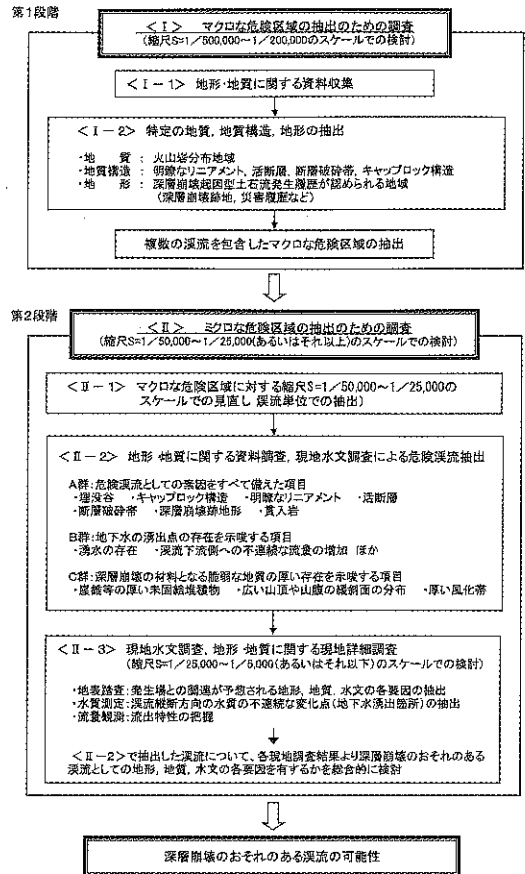


図-1 抽出素案の概要

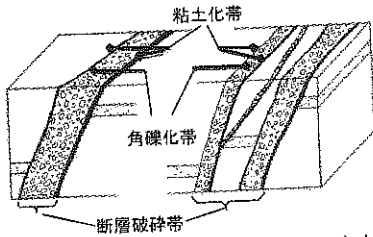
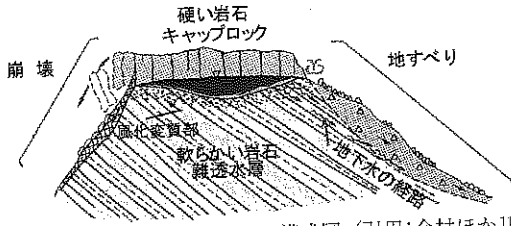
定な斜面が形成されていると考えられたからである。

町田ら⁷⁾は、国内における巨大崩壊（崩壊土砂量 10^7m^3 以上）の発生箇所のうち、約30%の崩壊が第四紀火山岩類（安山岩）の区域で発生していることを示している。磯山ら⁸⁾は、国内の第四紀火山岩類の分布面積が国土の約9%しかないことを報告しており、これら2点のことから、井口⁹⁾は、大規模崩壊が第四紀火山岩類の分布する山地地域で発生しやすい土砂移動現象であるとしている。

これらのことを踏まえると、火山岩類の分布区域は深層崩壊の発生危険区域の主要な候補と考えられるが、現在進めている調査によれば、非火山岩地域の中・古生代および第三紀の付加体堆積岩地域でも発生している事例が確認されており、これらについては改めて報告する。

3.2.2 地質構造に関係する項目

活断層や明瞭なリニアメント（第四紀以前に活動した古い断層を含む）が認められる地点では、断層破砕帯を介して不連続面が形成されている。

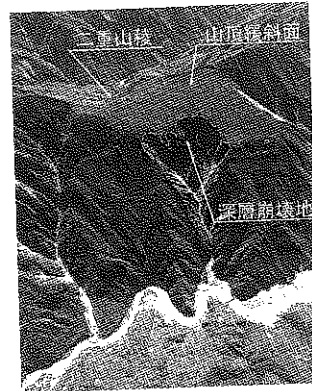
図-2 断層破碎帯の模式図 (引用: 千木良¹⁰⁾)図-3 キャップロック構造の模式図 (引用: 今村ほか¹¹⁾)

断層等が破断面のみで存在することは稀であり、角礫化帯や粘土化帯（断層ガウジ）で構成される断層破碎帯を伴うことが一般的で¹⁰⁾（図-2）、基岩が脆弱になることで地下水の流れと相俟って、深層崩壊に関与すると考えられている。断層破碎帯は、地質露头や土工のための地質調査成果などがなければその存在を知ることは稀であるが、断層やリニアメントの分布からその存在の有無をある程度は推定することができる。したがって、断層やリニアメントの分布から深層崩壊の発生危険区域を推測できる可能性が高い。

キャップロック構造とは、泥岩などの軟質岩石が溶岩や塊状の砂岩などのような風化に対して抵抗力のある岩石（キャップロック）に覆われて、雨水による侵食から保護された状態にあることを指す（図-3）。キャップロックが地表に露出して長い時間が経過すると、大きく崩壊を起こすことがある。崩壊の形態としては、節理が原因で生じる受け盤側のキャップロックの崩壊および流れ盤側の崩積土や軟質岩の地すべりが一般的である。キャップロックとなっている節理の発達した硬質岩石は亀裂を通して雨水を浸透させ、軟質岩との境界に地下水を涵養することから深層崩壊の発生に寄与していると考えられている。

3.2.3 地形に関する項目

深層崩壊履歴（崩壊跡地形）のある区域の周辺は、崩壊発生に関係する類似の要因が備わっていると考えられるため、発生危険箇所が分布する区域としての可能性が高い。

図-4 山頂緩斜面と二重山稜 (引用: 鈴木¹²⁾)

3.3 ミクロな危険区域の抽出のための調査項目

この段階の調査項目は、最初に第1段階と同一の項目について大縮尺（1/5万～1/2.5万の縮尺）での見直し作業から始め、次に地形・地質および水理水文に関する資料調査と現地調査を行う。ここでは、第1段階の調査項目になく、机上調査で抽出可能な山頂緩斜面について述べる。

山間地の尾根部には、周囲の斜面と比べて明らかに勾配が緩く、広い面積を持つ斜面がある。これを山頂緩斜面と呼ぶ（図-4）。老年期山地や準平原が隆起に伴う河川の回春により下刻されて、相対的に高い位置に残存しているもので、山頂緩斜面があると雨水を貯留しやすく、これと河水の下刻作用により斜面の重力的な安定が崩れ、二重山稜（線状凹地）や等高線方向のリニアメント（並流谷、涸れ沢）など不安定化の前兆を示す地形が現れて、大規模な崩壊に繋がると考えられる。

3.4 指標となる抽出項目の妥当性

抽出素案の妥当性を評価するため、明治期（1868年）以降の約140年間に発生した豪雨に起因する深層崩壊のうち表-1に挙げた18箇所を対象に、災害前の地形図や空中写真等を用いて抽出素案に基づく机上調査（第1段階および第2段階のA群とC群）を行い、抽出指標の適合性を検証した。抽出結果を表-2に示す。

活断層や明瞭なりニアメントが認められる地点付近では、地殻変動によって地質構造が揉まれて脆弱になっていることが考えられることを3.2.2で述べた。第1段階の抽出結果を見ると、活断層や明瞭なりニアメントのどちらか一方のみでは適合度は低いですが、両者を明瞭なりニアメントとしてひとつにまとめると適合度は約80%（14/18）になる（表-2中の明瞭なりニアメント10事例と活断層6事例の重複を含んだ合算数）。一方、断層破碎帯については、通常は崩壊発生前に地形図等の図

面から読み取ることとはほとんど不可能であり、本報では崩壊発生後に実施された現地調査や既往文献から整理した。その結果、3.2.2の内容を裏付けるように、断層破碎帯についても高い適合度80% (14/18) となった。

第2段階においては、より大縮尺の地形図・地質図および空中写真を用いることによって、第1段階で適合度の高かった項目が再確認されるとともに、隣接地域にある深層崩壊の発生履歴や崩壊発生箇所の特徴の一つである山頂緩斜面の存在などの抽出指標の適合度が高くなった。

埋没谷、キャップロック構造、崖錐等の厚い未

表-2 抽出指標の適合評価

抽出指標の項目		適合度
第1段階	地質	火山岩分布区域 6/18
		明瞭なりニアメント 10/18
	地質構造	活断層 6/18
		断層破碎帯 14/18
		キャップロック構造 4/18
第2段階	地形	深層崩壊跡地 2/18
		埋没谷 3/18
		キャップロック構造 5/18
		明瞭なりニアメント 17/18
	A群	活断層 5/18
		断層破碎帯 17/18
		深層崩壊跡地 18/18
		崖錐等の厚い未固結堆積物 2/18
	C群	山頂および山腹の緩斜面 13/18
		厚い風化帯 13/18

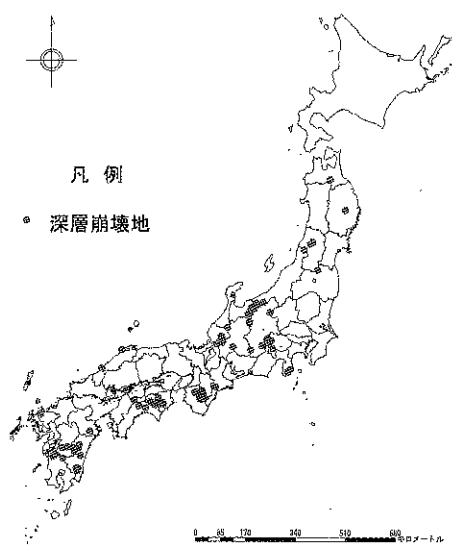


図-5 深層崩壊地の全国分布
(崩壊地抽出調査の対象期間：1869年～2006年)

固結堆積物は抽出指標としての出現頻度が他の指標よりも低かったため、見かけの適合度は低くなっている。現時点では他の抽出指標より優先順位は低いと考えられる。

3.5 深層崩壊の全国分布の特徴

明治期(1868年)以降で、豪雨に起因する深層崩壊に限って日本全国の発生事例を既往文献から調査した。抽出条件は、2. で記したように崩壊土砂量が 10^5 m^3 以上、崩壊深が5m以上のものとした。事例数は122箇所となった。分布状況を図-5に示す。

この図を見ると、発生箇所の分布には偏りがあり、特に糸魚川-静岡構造線から東側の東北日本では少なく、中央構造線沿いに崩壊が集中していることが特徴である。

4. 鰐塚山周辺で発生した深層崩壊発生区域への抽出素案の適用

抽出素案に基づいて2005年9月に深層崩壊が発生した鰐塚山周辺の溪流の抽出が可能であるか検証を行った。なお、第2段階の抽出作業には現地調査が含まれるが、本報の検討時点は崩壊の発生後ということになり、現地調査を実施することが困難であったので、B群の評価は省略する。

4.1 災害時の気象概況

鰐塚山周辺で深層崩壊が発生した際の気象概況について記す。

2005年8月29日に発生した台風14号は、9月6日14時に長崎県諫早市付近に上陸し、ゆっくりとした速度で北へ進んだため、九州から四国にかけて長時間にわたって大雨と暴風をもたらした。宮崎県内では、4つのアメダス観測所(気象庁)で3日から8日までの連続雨量が1,000mmを超え、このうち宮崎市田野町の「鰐塚山」では1,013mm(3日～6日)を記録した¹³⁾。別府田野川沿いの住民によると、6日8時30分頃に川を流れる石音が聞こえなくなり、9時過ぎに停電となって近くのスギの立木が大きく揺れ始めたということで、この前後に崩壊が発生したと考えられる。

鰐塚山周辺の主な深層崩壊は15箇所あり、総崩壊土砂量は約528万 m^3 となった¹⁴⁾。

4.2 マクロな危険区域の抽出結果

机上調査による抽出結果を表-3 (1) に示す。ここでは鰐塚山地が深層崩壊のおそれのある区域として抽出できるかを検証した。

鰐塚山周辺は火山岩類の分布区域ではなく、古第三紀の付加体堆積岩類区域であり、地質条件の

抽出からは外れた。地質構造の条件では、清武川水系の右岸側地域には断層があるため、明瞭なりニアメントや断層破碎帯の存在の可能性が該当した。また、鰐塚山北西区域も大淀川水系の一部として同様に抽出され、これらのことから鰐塚山北東地域は危険区域の候補として抽出された(図-6)。

4.3 ミクロな危険区域の抽出結果

深層崩壊が発生した鰐塚山周辺の4流域を実際に抽出できるか検証した。抽出結果を表-3(2)に示す。

抽出作業では机上調査のほかに、崩壊発生前の2003年に撮影された空中写真を用いた微地形解析を行った。解析結果は、国土地理院発行の2.5万分の1の地形図を200%拡大し、これを基図にした微地形判読図として表した。

抽出素案のA群の指標のうち、各流域とも明瞭なりニアメントと深層崩壊跡地形の2項目が該当した。明瞭なりニアメントが認められたことから、3.4で述べたように断層破碎帯の存在も推定される。崩壊材料となる脆弱な地質の分布に関わるC群の指標について見ると、判読結果から広い山頂緩斜面と一部に崖錐等の厚い堆積物の2項目が認められ、4流域とも危険渓流として抽出された。

4.4 別府田野川流域における降雨応答

降雨が深層部に達して貯留されることにより、一般に深層崩壊の発生は降雨のピーク時刻よりも遅れることが特徴と言われている。また、1997年に深層崩壊の発生した針原川流域と隣接する江良川流域における水文観測結果からは、渓流水の流量、電気伝導度(EC)、シリカ(SiO_2)濃度が急激に増加する地点と湧泉および深層崩壊跡地の分布が一致しているという報告¹⁾がある。

別府田野川流域では、2006年8月17日から18日に総雨量約230mmを記録する降雨があった。この時の最大時間雨量は、「いこいの広場」で17日22~23時に32.5mm(この時山頂では11mm)、鰐塚山山頂で18日4~5時に22mmを記録している(図-7)。左支溪うつら谷の崩壊地(鰐塚山北東斜面)から約4.2km下流地点の砂防えん堤で記録された出水時のビデオ画像では、出水ピークが17日24時頃と18日6時頃に見られ、ピークの遅れは特に確認されなかった。このことから深層崩壊の抽出を目的に流量のピークの遅れを確認するためには、崩壊の発生危険箇所に近い1次谷のよ

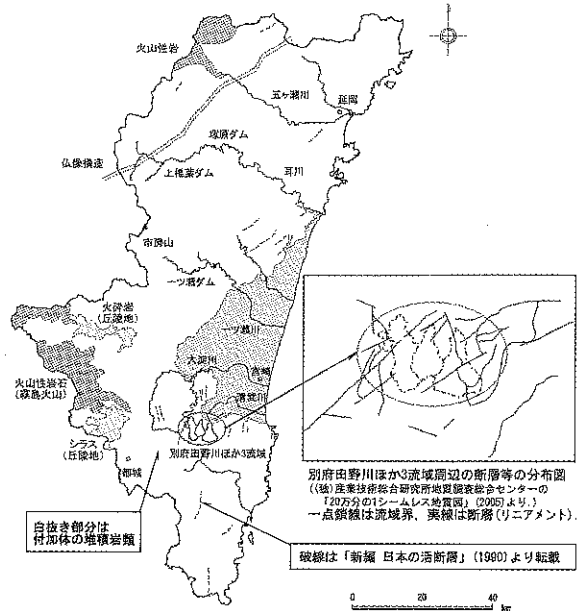


図-6 マクロな危険区域の抽出(宮崎県鰐塚山への適用事例)

表-3 抽出素案の適用結果

(1) マクロな危険区域の抽出 (深層崩壊が発生する可能性のある広域的な流域を探す)			(2) ミクロな危険区域の抽出 (深層崩壊が発生する可能性のある斜面を持つ渓流を探す)		
抽出項目	評価		抽出項目	評価	
地質	火山岩分布地域	—	素因をすべて備える	危険渓流としての キャップロック構造 明瞭なりニアメント 活断層 断層破碎帯 深層崩壊跡地形 貫入岩	— — — — — —
地質構造	明瞭なりニアメント 活断層 断層破碎帯 キャップロック構造	○ △ △ ▲	厚い存在を 示唆する	崖錐等の 厚い未固結堆積物 広い山頂や山腹の 緩斜面の分布 厚い風化帯	△ ○ ▲
地形	深層崩壊発生履歴が 認められる地域 (深層崩壊跡地、 災害履歴など) 水系網 組織地形 (ホッグバック、 ケスタ、メサ)	▲ △ ▲			

評価
○: 該当する
△: 一部該当する
▲: この段階では判断が困難
—: 該当しない

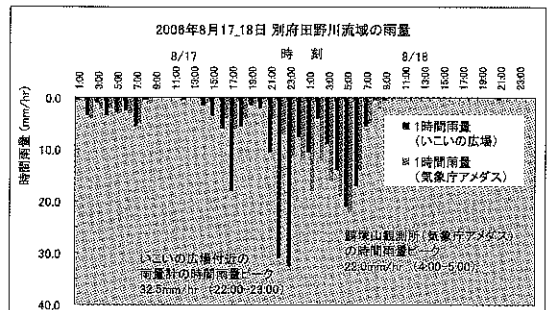


図-7 2006年8月降雨のハイレートグラフ

うな上流部での観測が必要と考える。

5. 深層崩壊の発生のおそれのある溪流の抽出についてのまとめと課題

以下に、まとめと課題を記す。

- 1) 深層崩壊箇所を対象に抽出指標との関係を考察した結果、活断層や明瞭なリニアメント、山頂緩斜面等の崩壊発生箇所に共通する地形・地質的な特徴が認められ、抽出素案で採用した指標は必要条件を満たしていることが示された。今後は、非崩壊斜面との比較を行い、抽出指標が一般的な優位性を持ち、指標としての必要十分条件となっているかを確認する必要がある。
- 2) 深層崩壊が発生した鰐塚山周辺に適用した結果、マクロ及びミクロな危険区域の抽出がある程度可能であることが明らかになった。本報の検討は、崩壊の発生した箇所を既知としていて、その箇所を含む周辺区域が抽出素案の手順どおりに抽出できるかという過程を辿っている。明治期以降に崩壊履歴のない地域に対して適用した場合、抽出素案によって危険区域の抽出割合がどの程度になるか検証しておく必要がある。
- 3) 客観的（あるいは定量的）な評価が可能な抽出指標を適用するには、GISの空間情報解析機能を活用し、リモートセンシングデータや数値地形データ等から得られる地被状態、地形的な特徴等の解析結果を利用することが考えられる。

参考文献

- 1) 岩松 暉、下川悦郎：九州山地の大規模崩壊、文部省自然災害特別研究（1）自然災害科学研究所西部地区

- 部会報, pp. 79-89, 1986
- 2) 寺戸恒夫：大規模崩壊による山地地形の変化－山地崩壊の地形学的研究－, 地理科学, 28号, pp. 17-27, 1977
- 3) 地頭蘭隆、下川悦郎、寺本行芳：地下水が関与した崩壊発生場の予測手法の開発、平成16年度砂防地すべり技術研究成果報告会講演論文集, pp. 41-64, 2004
- 4) 羽田野誠一：大規模崩壊の発生と地形・地質条件－最近35年間の事例の比較解析－, 第19回自然災害科学総合シンポジウム, pp. 115-118, 1968
- 5) 地頭蘭隆、下川悦郎、寺本行芳：深層崩壊発生場予測手法の提案－鹿児島県出水市矢筈岳山体を例にして－, 砂防学会誌 (No.265), 第59巻、第2号, pp. 5-12, 2006
- 6) (社) 砂防学会編：改訂砂防用語集, p. 146, 山海堂, 2004
- 7) 町田 洋、古谷尊彦、中村三郎、守屋以智雄：日本の巨大山地崩壊、文部省科学研究費自然災害特別研究（1）報告書「崩壊の規模、様式、発生頻度とそれに関わる山体地下水の動態」, pp. 165-182, 1987
- 8) 磯山 功、斎藤英二、渡邊和明、橋本智昌、山田直利：100万分の1日本地質図（第2版）から求めた各種岩石・地層の分布面積、地質調査所月報、第35巻、第1号, pp. 25-47, 1986
- 9) 井口 隆：日本の第四紀火山で生じた山体崩壊・岩屑なだれの特徴－発生状況・規模と運動形態・崩壊地形・流動堆積状況・発生原因について－, 日本地すべり学会誌, 第42巻、第5号, pp. 29-40, 2006
- 10) 千木良雅弘：災害地質学入門, p. 29, 近未来社, 2001
- 11) 今村達平、岩田健治、足立勝治、塚本 哲：画でみる地形・地質の基礎知識, p. 86, 鹿島出版会, 1986
- 12) 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門3 段丘・丘陵・山地, pp. 555-942, 古今書院, 2000
- 13) 気象庁宮崎地方気象台：災害時気象資料 第2版 平成17年台風第14号に伴う9月4日から6日にかけての宮崎県の気象状況について, http://www.fukuoka-jma.go.jp/emr1/T14_miyazaki.pdf, 2005
- 14) 宮崎県土木部砂防課：鰐塚山系土砂災害対策検討委員会報告書, p. 35, 2006

鈴木隆司*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム交流研究員
Ryuji SUZUKI

栗原淳一**



長野県砂防課（前）独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム上席研究員
Junichi KURIHARA

桜井 亘***



高知県防災砂防課（前）独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム総括主任研究員
Wataru SAKURAI

酒井直樹****



独立行政法人防災科学技術研究所水・土砂防災研究部研究員（前）独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム研究員, 工博
Dr. Naoki SAKAI