

豪雨の実態と最近の土砂災害

静岡大学名誉教授

国土防災技術（株） 斜面環境研究所

土屋 智

講演内容

本日のテーマ

土砂移動現象の発生予測に関わる降雨量と土砂災害警戒
情報

岐阜県郡上市奥田洞の土砂災害（2018年，2020年）
2017年九州北部豪雨災害における斜面崩壊
2018年中津市耶馬溪町の地すべり性崩壊

土砂移動現象の発生予測に関わる降雨量

降雨因子と予測方法

1) 日本

因子：時間雨量，累加雨量；実効雨量，土壌雨量指数

予測法：平成17年以前は，半減期1.5時間実効雨量と半減期72時間実効雨量を用い，スネーク曲線により時々刻々評価していた。その後は，「国交省と気象庁連携方式」が適用され，過去の時間降雨量と土壌雨量指数を関係をニューラルネットワーク（RBFN）を用い閾値を定め，スネーク曲線により時々刻々評価している。

2) ヨーロッパ（ID法）

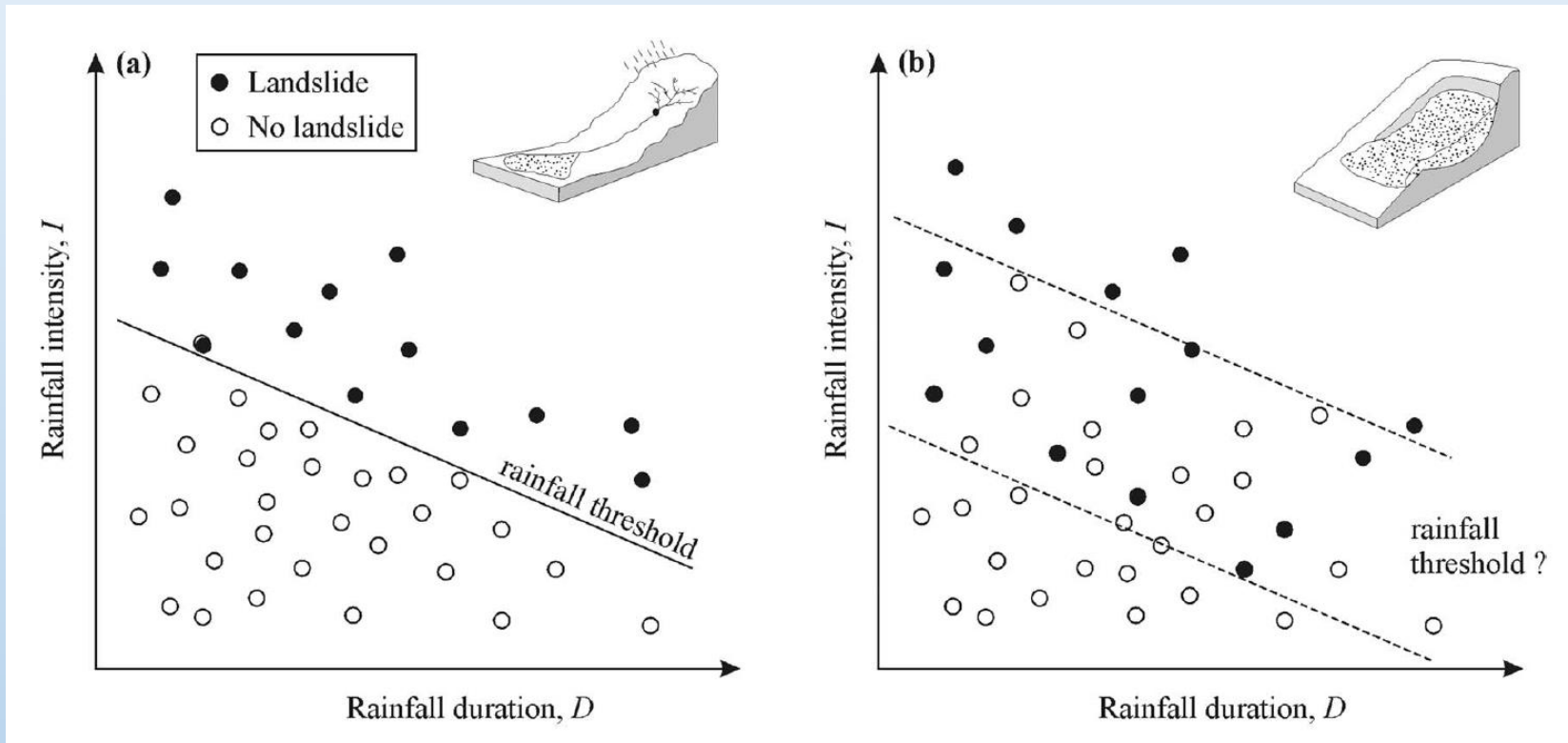
因子：平均降雨強度，降雨継続時間→（Guzzettiの方法）

予測法：土砂移動現象が起きた時間までの平均降雨強度と降雨継続時間のデータを両対数軸で整理し， $I = \beta D^\alpha$ 式により判断する。スネーク曲線により時々刻々の評価が可能。

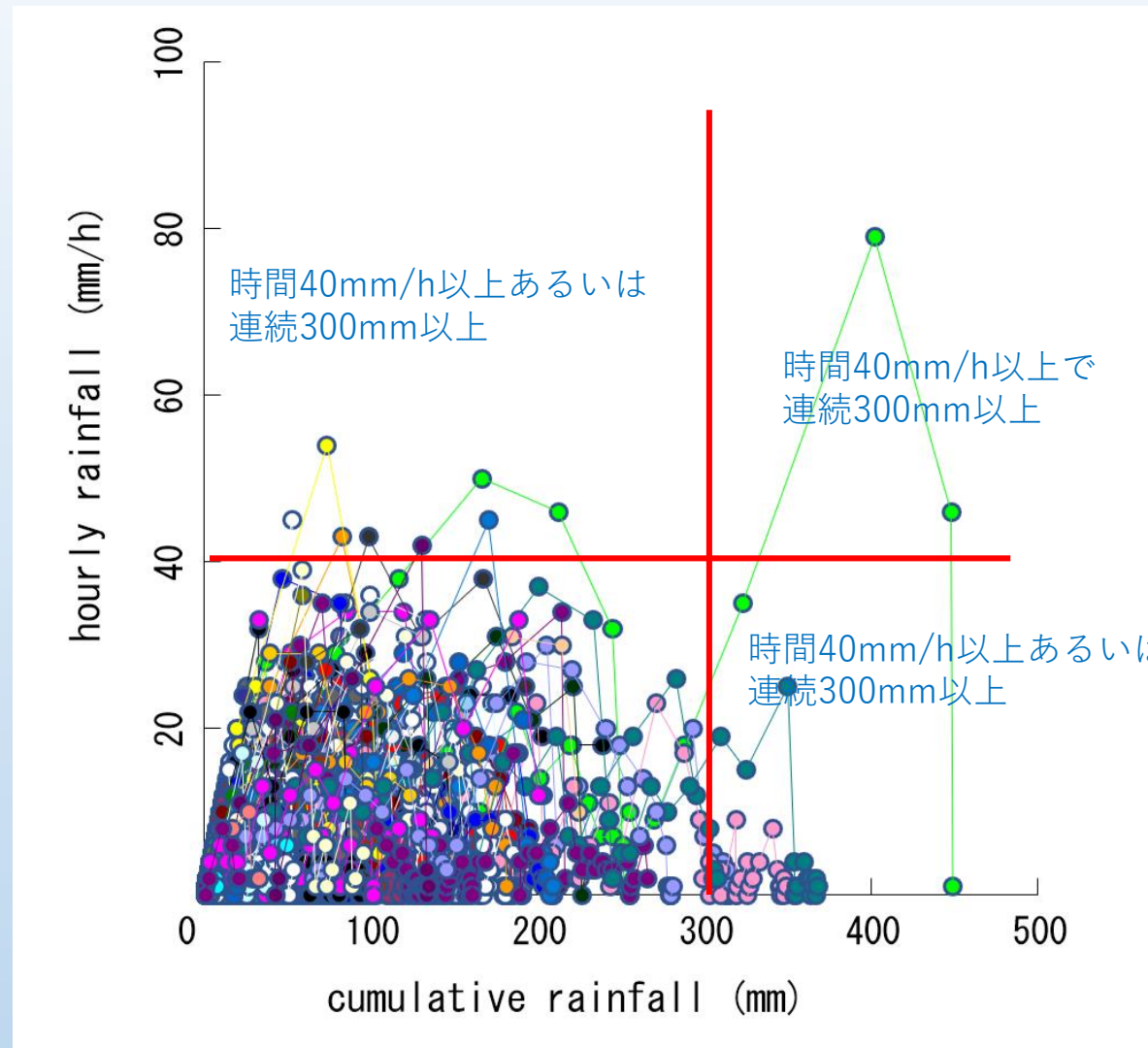
降雨と土砂移動現象

降雨と土砂移動現象の発生に関する一般的知見

- 土砂移動現象は、土層中に浸透した雨水が蓄えられた場所に強雨が加わると発生しやすい。
- 発生時には、その時の降雨だけではなく、それ以前の降雨（前期雨量）が土層中にどの程度残存していたかが大きく影響する。
- 降雨後のがけ崩れ、土石流の発生は、時間経過とともに降雨の影響が低下すると予想される。



降雨強度 - 連続雨量の対比を用いた基準



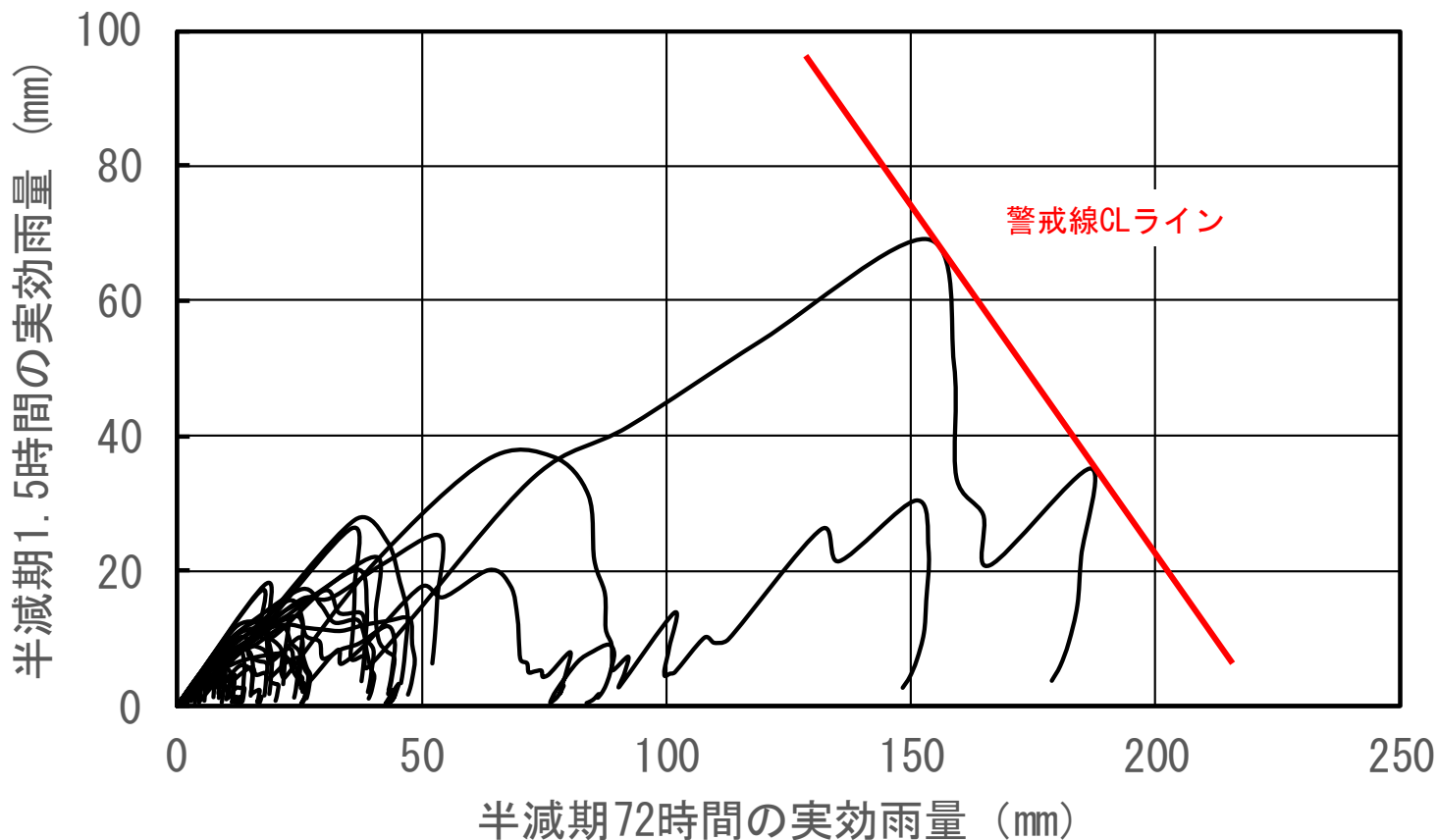
時間雨量と連続雨量の対比例

(国交省水文水質データベース, 奈良間観測所, 2002-2015年, 時間降雨記録使用)

実効雨量を用いた警戒雨量(旧基準)

$$R_t = p_t + a_1 \cdot p_{t-1} + a_2 \cdot p_{t-2} + \dots + a_n \cdot p_{t-n}, \quad a_i = \left(\frac{1}{2}\right)^{i/T}$$

R_t :時刻 t の実効雨量, p_t :時刻 t の時間雨量, $t-n$:降雨開始時刻, a_i :減少係数, T :半減期時間



半減期1.5時間と半減期72時間の実効降雨量の対比例 (旧基準)

(国交省水文水質データベース, 奈良間観測所, 2002-2015年, 時間降雨記録使用)

土砂災害警戒情報の発表基準（現行）

ニューラルネットワーク（RBFN）を適用し降雨の降り方に関する特徴に基づいて判断している。

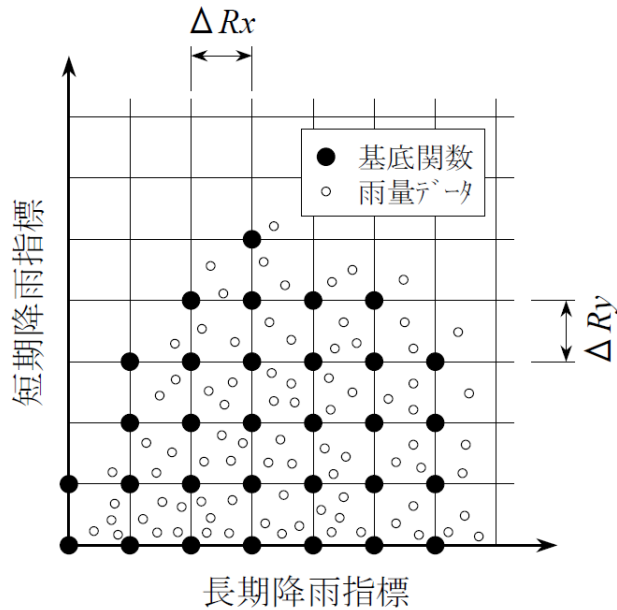
- 土砂災害警戒情報に用いる雨量基準は、実効雨量にもとづく線形CLが多く用いられてきた。しかし、土砂災害発生時の降雨量データが蓄積されないと、的中精度の向上は期待できない。
- 複雑な気象現象を実効雨量式のような線形関係で捉えることの妥当性や線形CLの設定が一部主観的であることなどの課題が指摘されていた。実際に避難情報を出しても災害が発生しない“空振り”が多かった。
- このため、数学的な学習モデル（動径基底関数ネットワーク（RBFN, Radial Basis Function））を応用することになった。
- 過去の降雨量と土壌雨量指数を用いRBFNにより危険度空間を求め、土砂災害の発生時データを参考に危険度指標境界線（CL）を設定し、土砂災害警戒避難基準雨量を評価する方法が採用されている。

短期雨量指標：時間雨量を用いる。

長期雨量指標（土壌雨量指数）：水文予測で使われるタンクモデルの貯留高を用いる。

RBFNによる判別手法

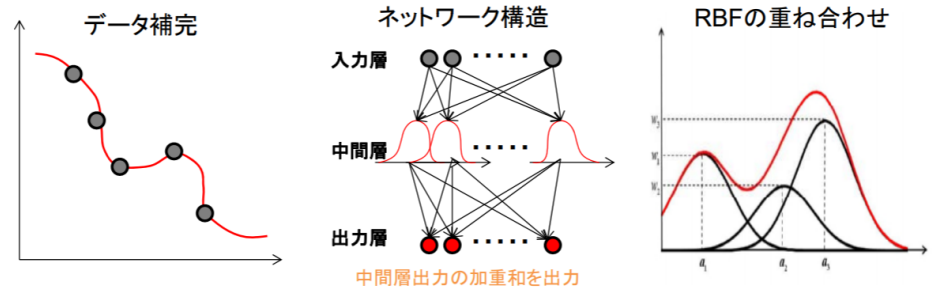
RBFNはニューラルネットワーク手法の一つである。時々刻々求めた土壌雨量指数（タンクモデル出力値）とその時刻の時間雨量を下図のように配分し、個々のメッシュの中心と分散を入力値としてガウス関数による統計学習を行い、土砂災害の危険度を表す判別境界面から非線形の CL を設定する方法。



RBFネットワークを用いた土砂災害 判別手法 (1)

RBFネットワークとは

- ◆ データ補完手法の1つ (有限個のデータから近似関数を導く)
- ◆ 3層から構成されるニューラルネットワークで学習機能を持つ
- ◆ 非線形関数の近似 (ごちゃ混ぜのデータの判別) が得意
- ◆ RBFはRadial Basis Functionの略で「放射基底関数」のこと。ガウス関数がよく使われる

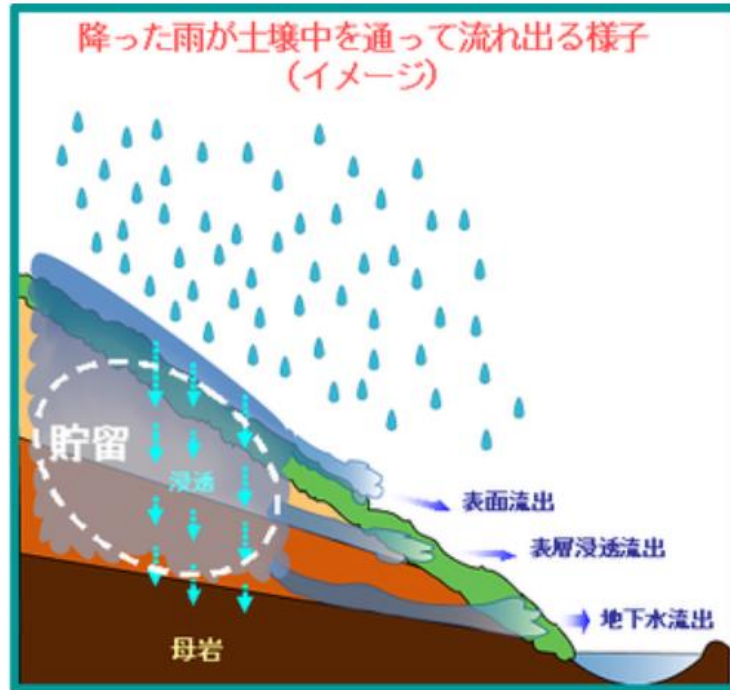


土砂災害が発生していない降雨事例のデータを入力として、RBFNにより「非発生降雨の発現確率」を求める

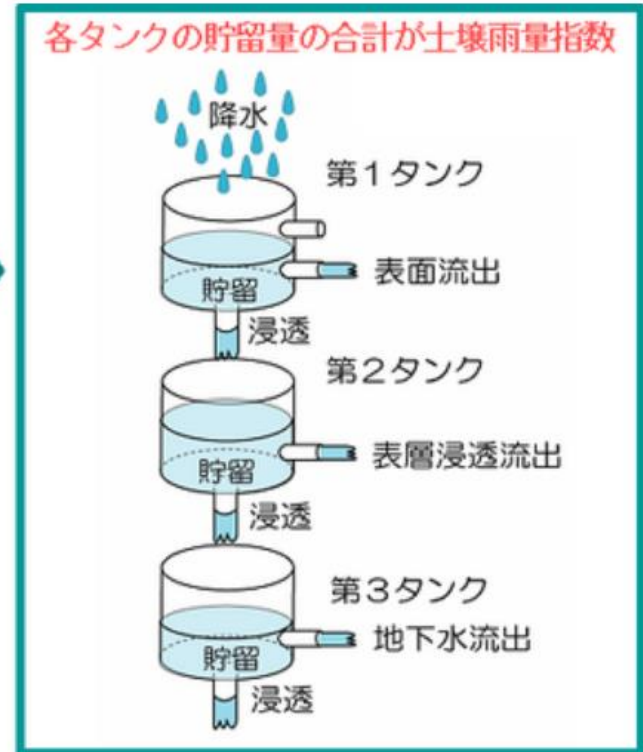
国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定手法 (国交省砂防部, 気象庁, 国総研, 2005)

降雨情報を活用した 災害発生危険度予測技術 (土砂災害) (気象庁予報部, 2013年5月)

土壤雨量指数（タンクモデルの貯留高）



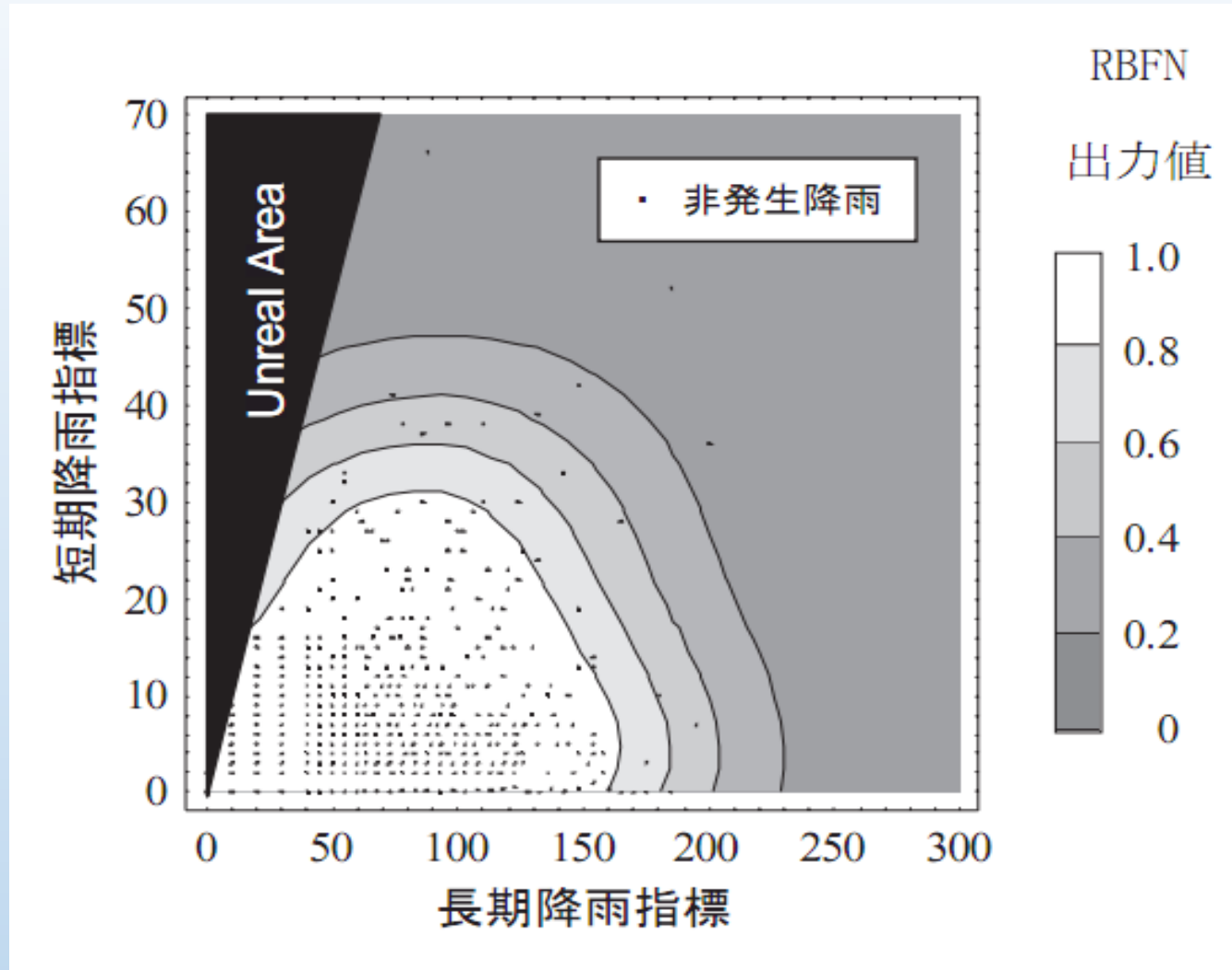
モデル化



土壤雨量指数は、各タンクに残っている水分量（貯留量）の合計として算出される（気象庁HP）。

- 全国同じパラメータを用いている。
- 比較的表層の地中をモデル化したもの。
- 積雪や融雪は考慮していない。

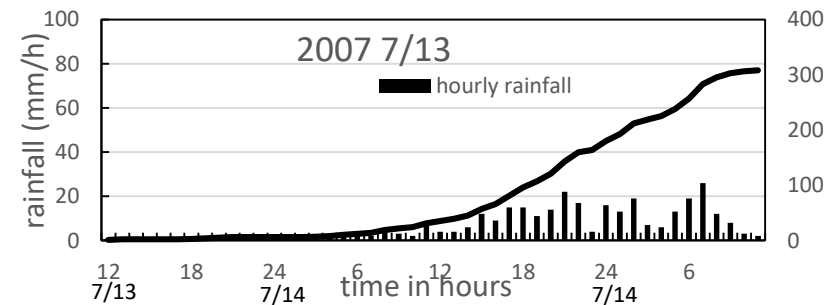
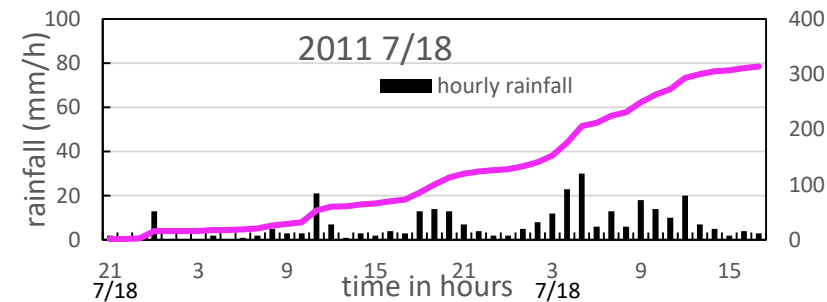
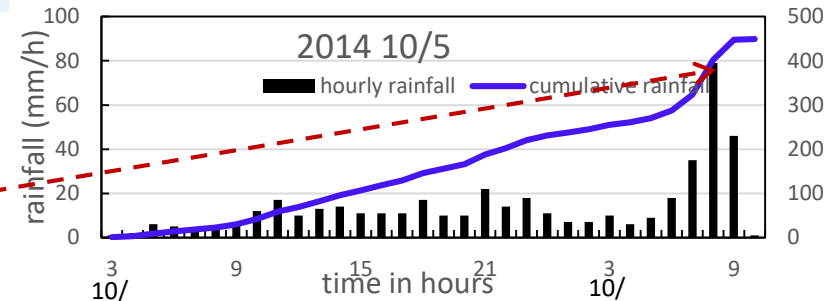
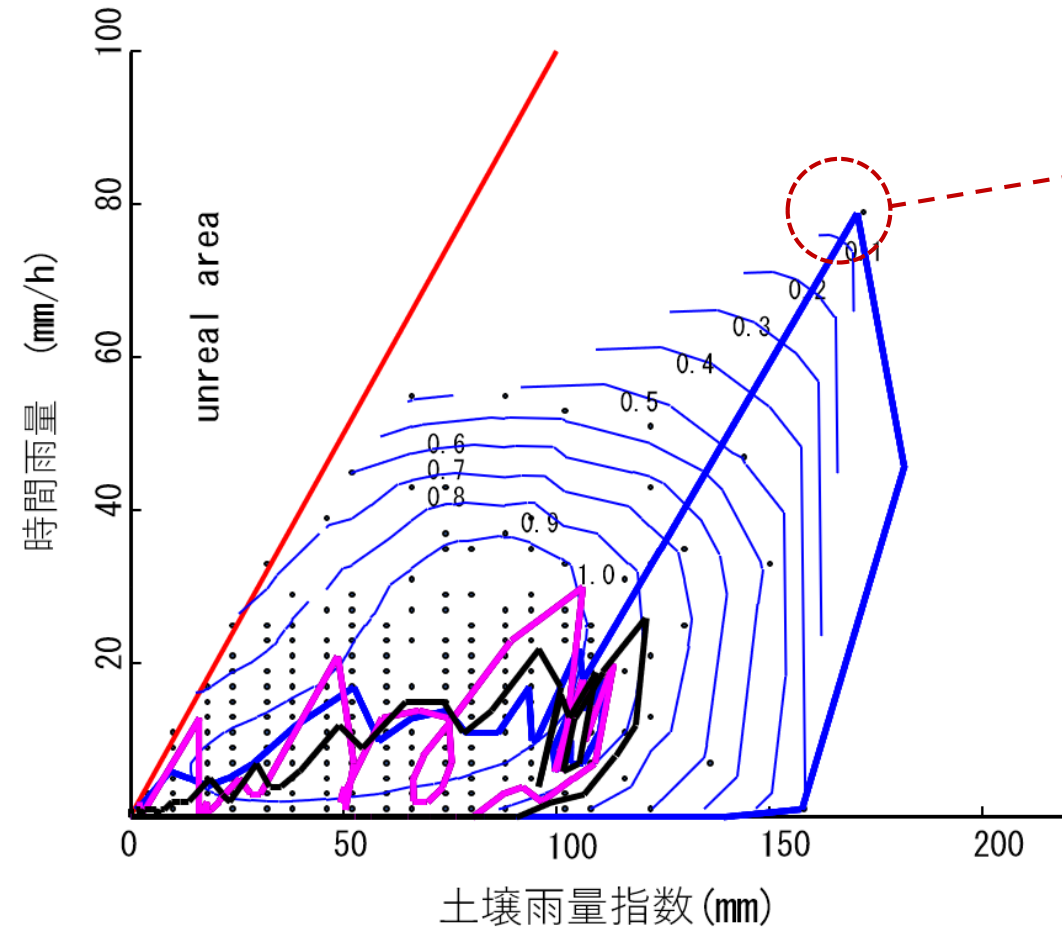
RBFNを用いた土砂災害警戒情報の基準（現行）



土砂災害警戒避難基準雨量の設定（国土交通省河川局砂防部, 2005）

短期雨量指標：時間雨量を用いる。長期雨量指標：タンクモデルの貯留高を用いる。

スネーク曲線による予測 (RBFN)

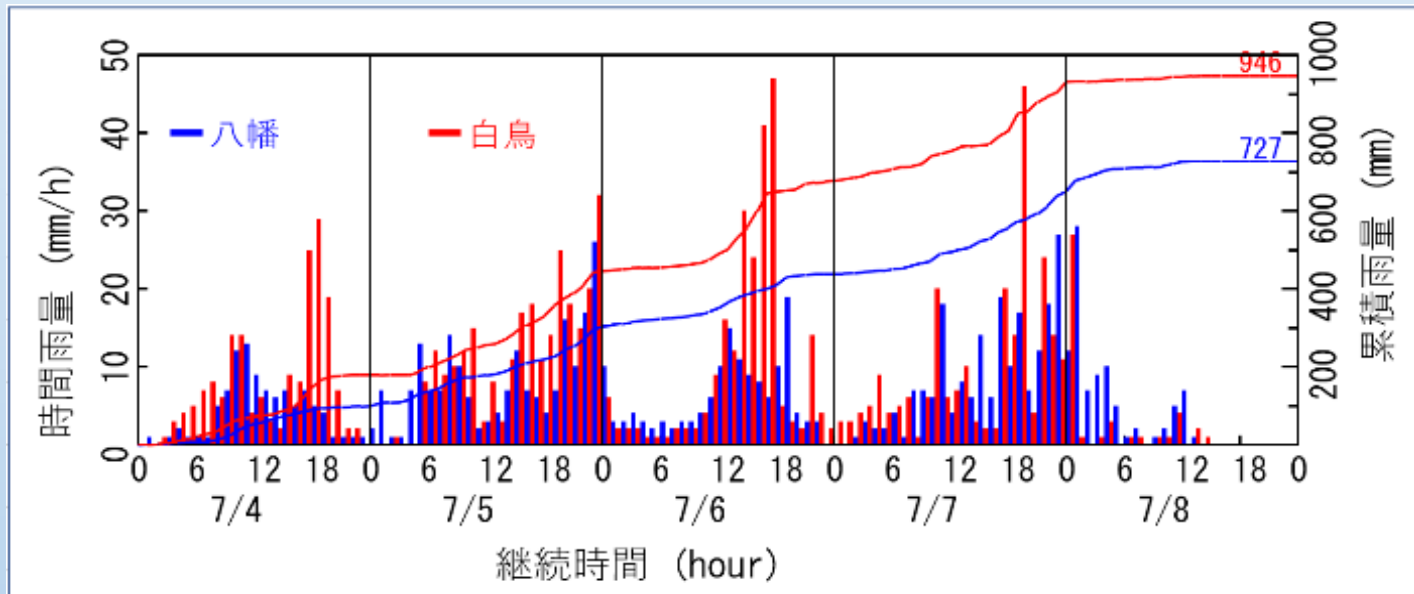


(国交省水文水質データベース, 奈良間観測所, 2002-2015年, 時間降雨記録使用)

2018年7月岐阜県郡上市奥田洞の土砂流出

2018年7月上旬、西日本を中心に長雨が続き、広島県呉市、愛媛県北部、福岡県では甚大な土砂災害が発生した。この大雨は岐阜県においても飛騨地域で1,000mmを超す記録的なものであり、中濃地域から飛騨地域にかけては、2018年7月4日零時過ぎから7日の午前にかけて断続的な強雨に見舞われた。

このため、長良川の上流域で堤防決壊の危険が生じたり、道路や鉄道の交通インフラに甚大な影響を与えた。しかしながら、森林地における斜面崩壊や土石流の発生箇所は少なく、流出した土砂量も多くはなかった。ここでは、郡上市内の森林山地で起きた斜面崩壊に伴う土砂流出状況とこれらを捕捉した砂防・治山施設について紹介する。

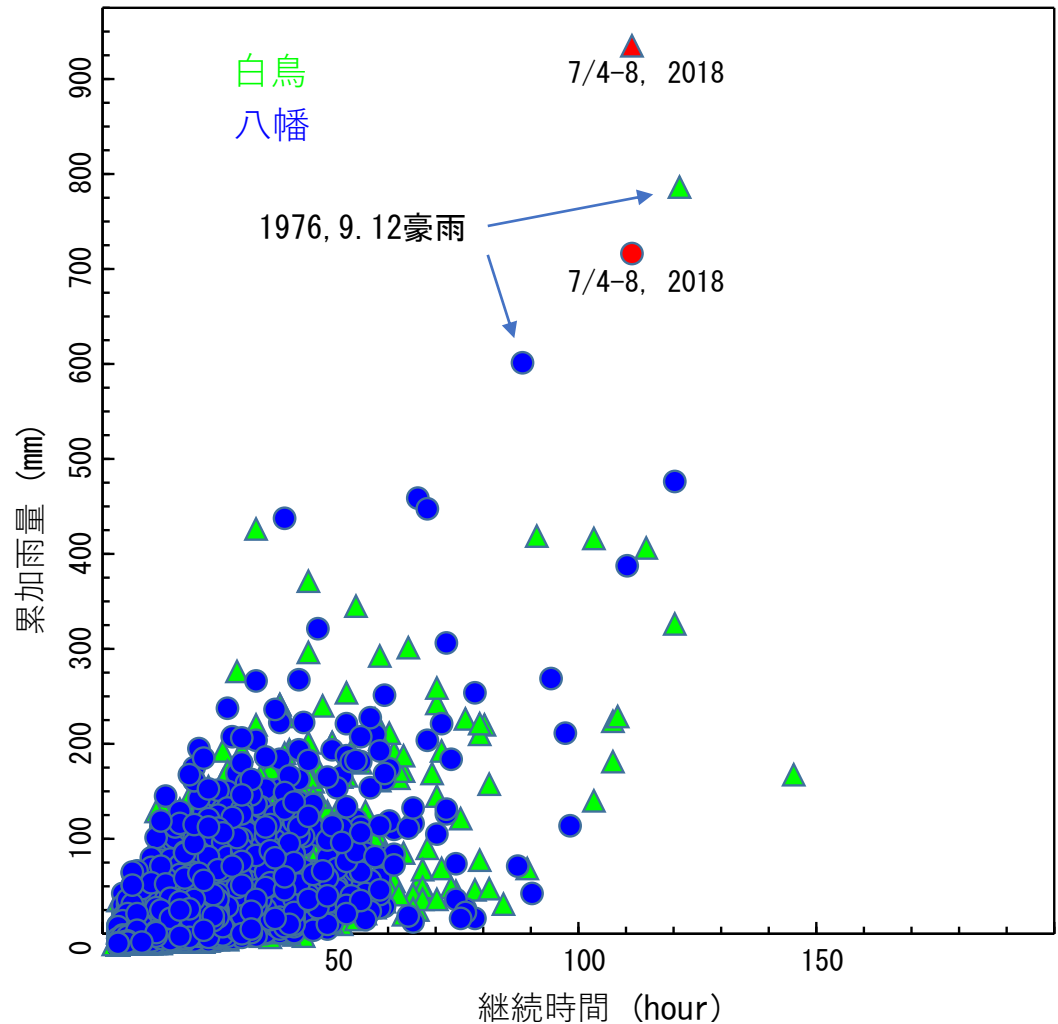


2018年7月上旬における白鳥観測所と八幡観測所における降雨記録
(国交省水文水質データベース)

2018年7月上旬の長雨の累加雨量と継続時間

1976年から2017年までの時間雨量記録から、一連の降雨イベント（無降雨6時間以上あれば、別降雨イベントとする）について、累加雨量と継続時間を対比（降雨イベント数：白鳥4,294回、八幡4,729回）。

- 対象期間中の降雨イベント数は4729回で、年間平均115回の降雨があった。
- 2018年7月豪雨は、データが密集する累積雨量500mm以上で継続時間110時間の範囲から外れ、過去42年間で突出した大きさである。
- 両観測所における降雨継続時間の109時間は、白鳥では期間内最大の143時間から4番目、八幡では118時間に次いで2番目の大きさであった。
- 両観測所とも第2位は、1976年に長良川の右岸堤防道路を決壊させた豪雨である。



白鳥観測所と八幡観測所降雨データによる累加雨量と継続時間の対比（赤塗りつぶしは2018年7月上旬の降雨）

2018年7月上旬の郡上市長雨の特徴

白鳥観測所と八幡観測所における2018年7月降雨の年超過確率（使用降雨データは1976-2017年）

	順位	超過確率(年)	累積雨量(mm)	発生年
白鳥	1	1445.3	946.0	2018
	2	407.5	797.5	1976
	3	13.8	437.0	1999
八幡	1	353.3	727.0	2018
	2	114.3	613.0	1976
	3	30.3	488.0	1998

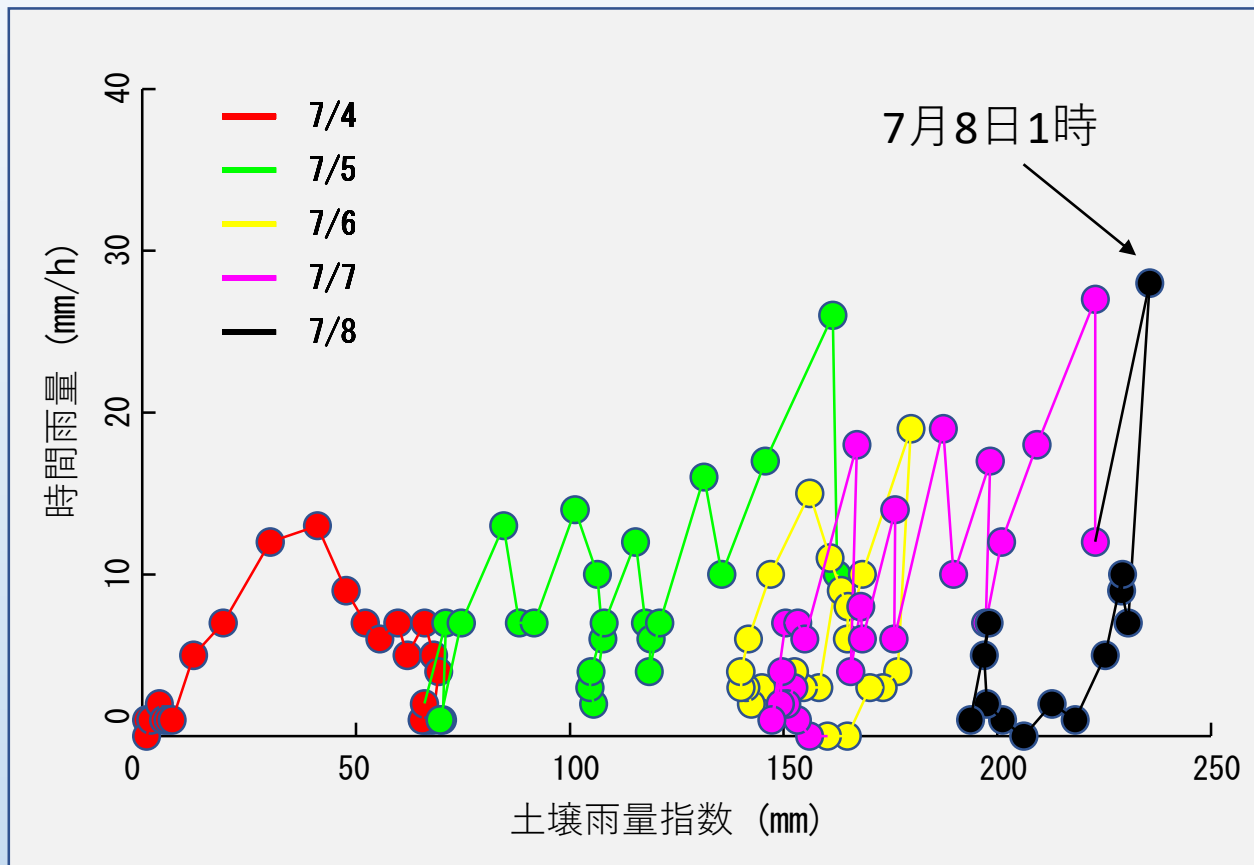
- 白鳥，八幡の累積雨量は，1976年以来第1位の大きさ，年超過確率は白鳥で1,000年以上，八幡では300年以上を示した。
- 降雨継続時間は白鳥で観測以来4番目，八幡で2番目の長さであった。
- 極めて稀な累積雨量を有する降雨で，その継続時間も長かったといえる。

2018年7月上旬の長雨のスネーク曲線

7月4日1時から8日13時までの土壌雨量指数（3段タンクモデル，諸係数は気象庁と同じ）を求め，スネーク曲線を求める。

➤ 土壌雨量指数は7日夜半から200mmを超え，8日1時に最大の236mmに達する。

➤ 奥田洞谷の崩壊は8日2～3時とされる。

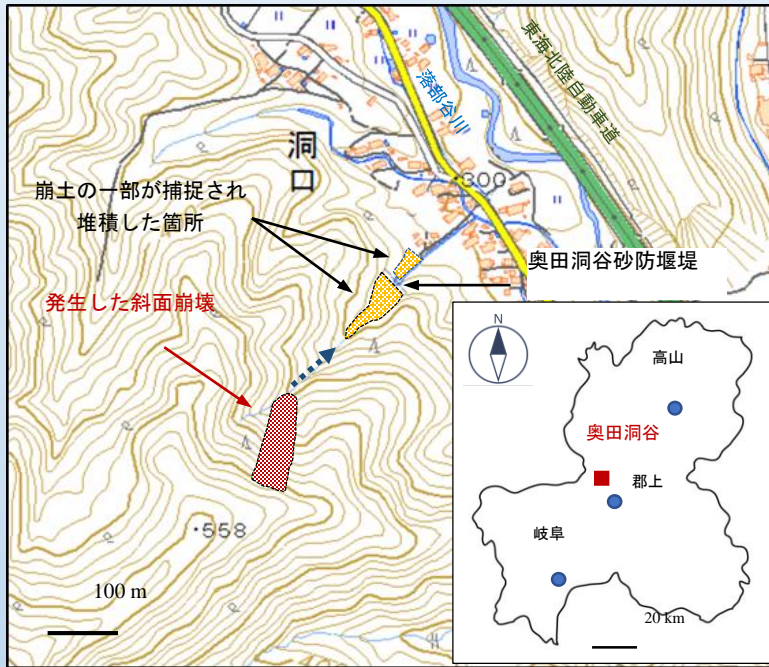


7月4日1時から8日13時のスネーク曲線（八幡観測所降雨データ，国交省水文水質データベース）

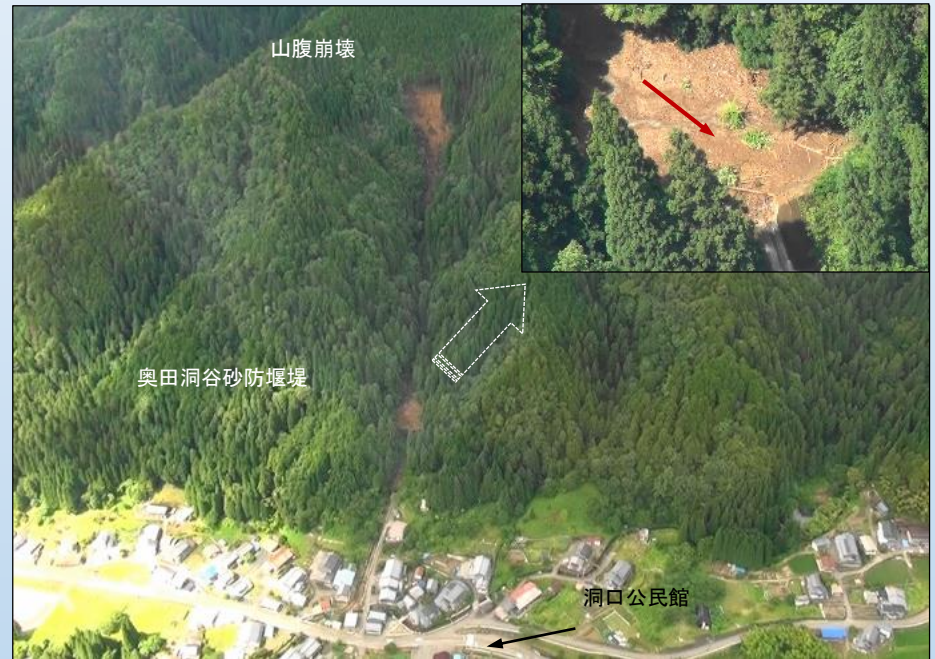
奥田洞の土砂災害

土砂流出の概要

- 岐阜県郡上市大和町では、2018年7月零時過ぎから7日の午前にかけて梅雨前線の活発化に伴う断続的な強雨に見舞われた。奥田洞谷においては、2018年7月4日未明に溪流源頭部の森林斜面でやや大きな山腹崩壊が発生し、その一部約5,000m³の崩土が溪流を下った。
- 奥田洞谷の出口には砂防堰堤、その下流側には帯工と流路工が設置されており、流動したほとんどの土砂はこれらの砂防施設で捕捉された。これにより、奥田洞谷下流の集落での土砂災害は発生しなかった。

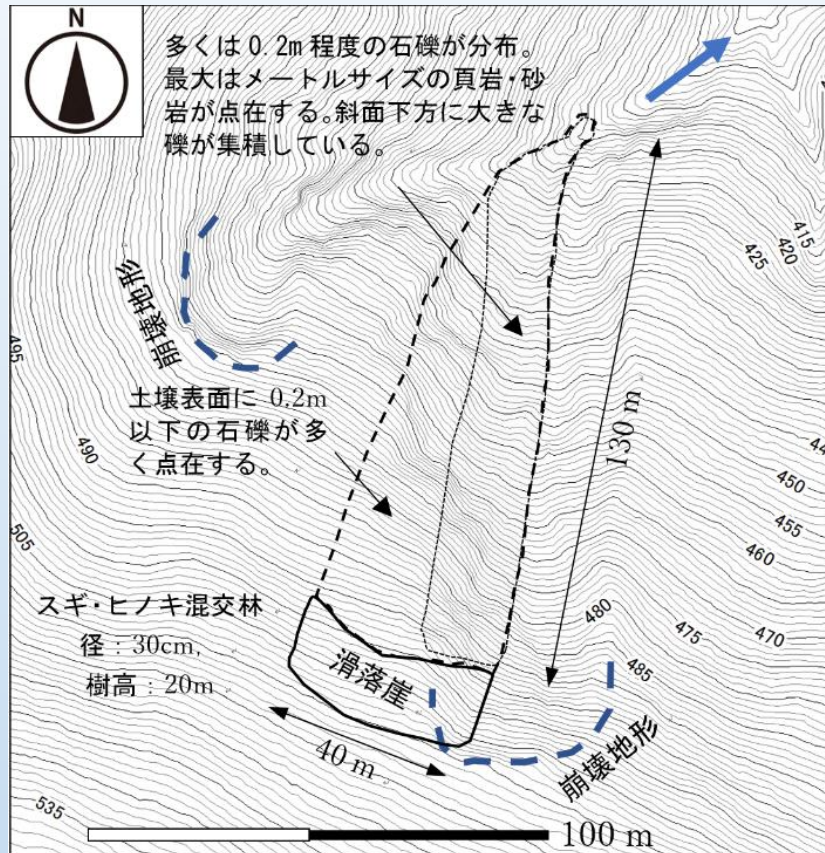


大和町奥田洞谷の位置と土砂流出



奥田洞谷の斜め写真（岐阜県砂防課）

奥田洞谷源流部における山腹崩壊



奥田洞谷源頭部で発生した山腹崩壊（地形図は岐阜県林政部が取得したLPデータを使用し作成）

山腹崩壊の規模は、幅40m、崩壊長100m、崩壊厚平均5mと見積もれるので、崩壊土量は約20,000m³と計算される

山腹崩壊地の源頭部と末端部（下端部には約20cmの岩塊のほかm級のものもある、8月31日撮影）

標高410m近辺から撮影、流木はそれほど多くはない。

奥田洞谷の土砂流出痕跡



奥田洞谷源頭部の土砂流出した跡。典型的なV字谷で、岩盤が露岩し溪床勾配は大きい。8月1日撮影。



山腹崩壊地の直下付近、土石流センサーが張られている。溪床から約2mまでの高さが土砂流出の痕跡。8月31日撮影。

奥田洞砂防堰堤から下流部



奥田洞砂防堰堤と溪流保全工の間にある平地。水通しを越えた1,000m³の崩土のうち、700m³がここに堆積した。左側は流路に積まれた土砂パック。

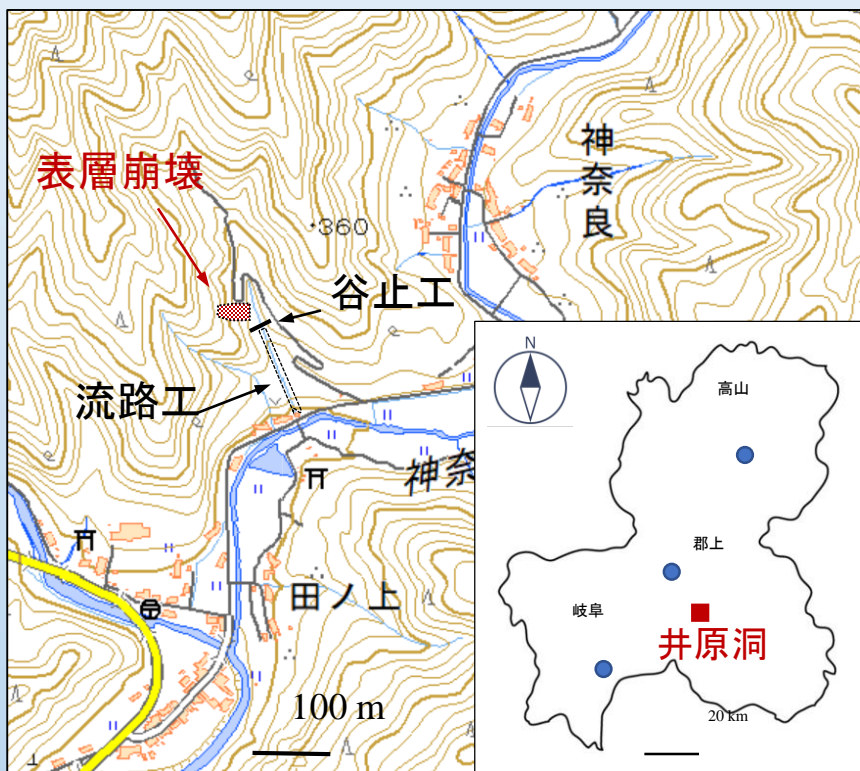


奥田洞砂防堰堤との下流に整備された溪流保全工。約300m³がここを流下し、下流の合流地点で堆積した。

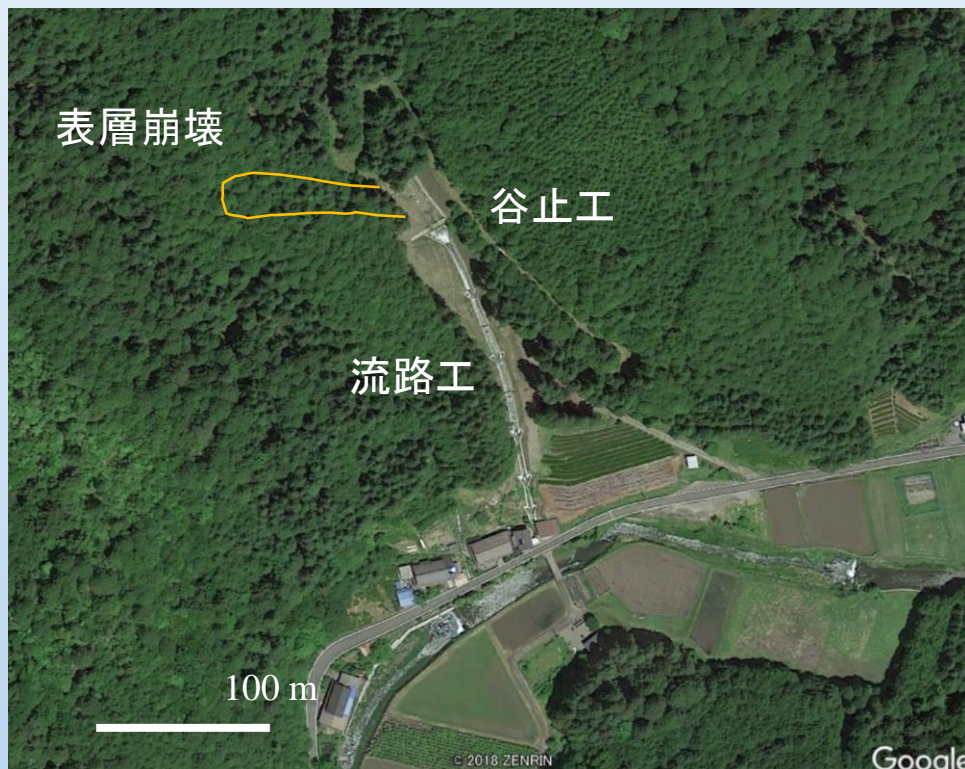
岐阜県郡上市八幡町井原洞の土砂流出

土砂流出の概要

- 八幡町小那比井原洞では、住家から北に150m上流に位置する溪流右岸側の山腹斜面で、表層崩壊が発生した。これにより流木を伴った崩土が、下流の住家付近で道路横断施設を閉塞し、土砂の一部が溢れた。
- ここでは、崩壊地の直下に治山堰堤（昭和51年）が設置され、その下流に流路工が整備（平成25年）されていた。これらの施設で崩土と流木の一部が捕捉され、下流への流出が抑制され大きな被害を生ずるには至らなかった。



小那比井原洞における表層崩壊と治山施設（国土地理院発行1/2.5万地形図に加筆）

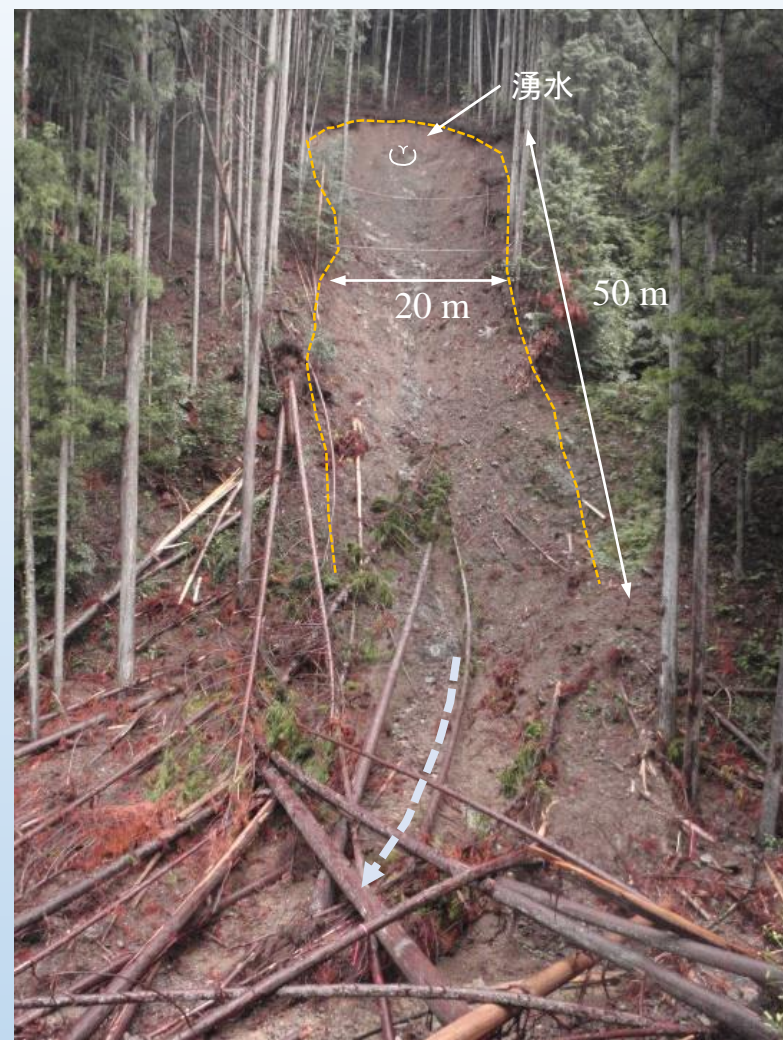


小那比井原洞の衛星写真（Google Map）

小那比井原洞における表層崩壊



小那比井原洞の溪間工（表層崩壊は谷止工直上右岸斜面で発生し、崩土と流木の一部は谷止工で捕捉され、流路工内を流下した）



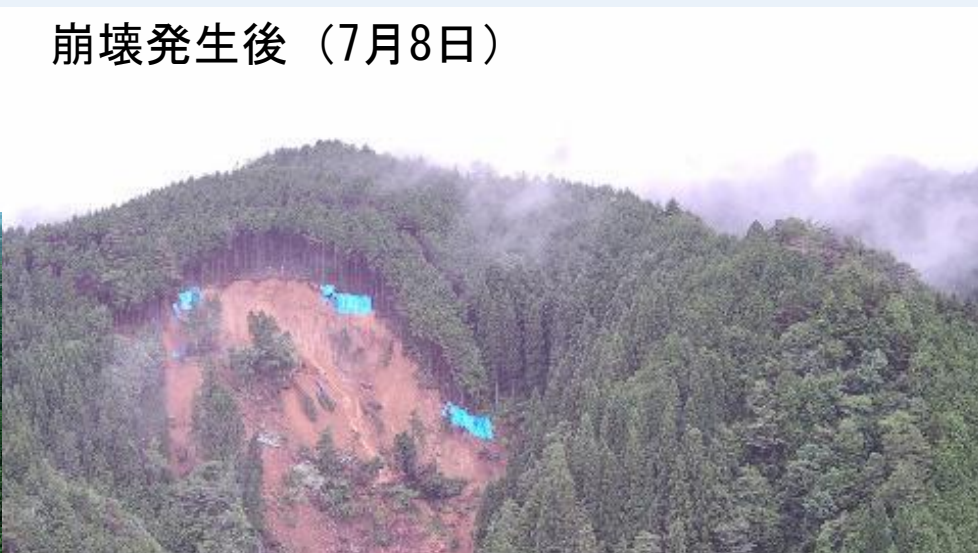
八幡町小那比井原洞のスギ・ヒノキ林で発生した表層崩壊（8月31日撮影）
発生規模は、幅約20m、長さ約50m、崩壊深さ約2mで、崩土量約2,000m³と見積もれる

2020年7月の奥田洞源流の拡大崩壊

郡上大和町奥田洞の源流では、平成30年7月豪雨により山腹崩壊（約2万 m^3 ）が生じていた。この崩壊地は、令和2年7月の豪雨により上部に拡大崩壊した。

崩壊発生後（7月8日）

崩壊発生前（6月15日）

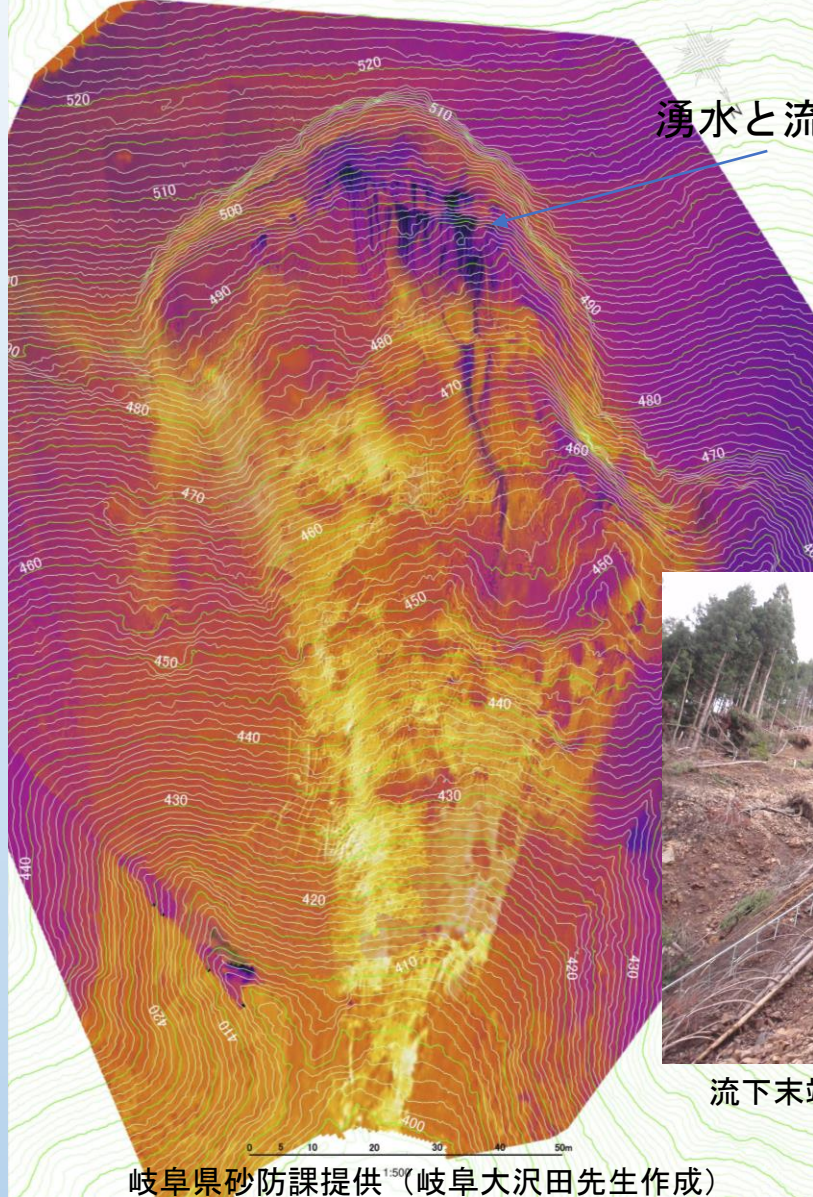


9月30日撮影



拡大崩壊地の状況

赤外写真とLP測量図（令和2年7月8日撮影）



湧水と流下痕



滑落崖（9月30日撮影）



流下末端から上流（9月30日撮影）



奥田洞堰堤上部に設置されたリングネット工

2020年拡大崩壊時の移動量記録と降雨量

➤6月11日

平成30年8月に起きた崩壊地からの土砂流出があり，崩壊上部を現地踏査したところ，滑落崖上部の山腹に亀裂を確認。

➤6月13日

亀裂を跨ぎ，伸縮計設置。

移動量：

➤6月13-16日

約66m (23mm/d)

➤6月13-30日

約130mm (8mm/d)

➤6月30日-7月7日

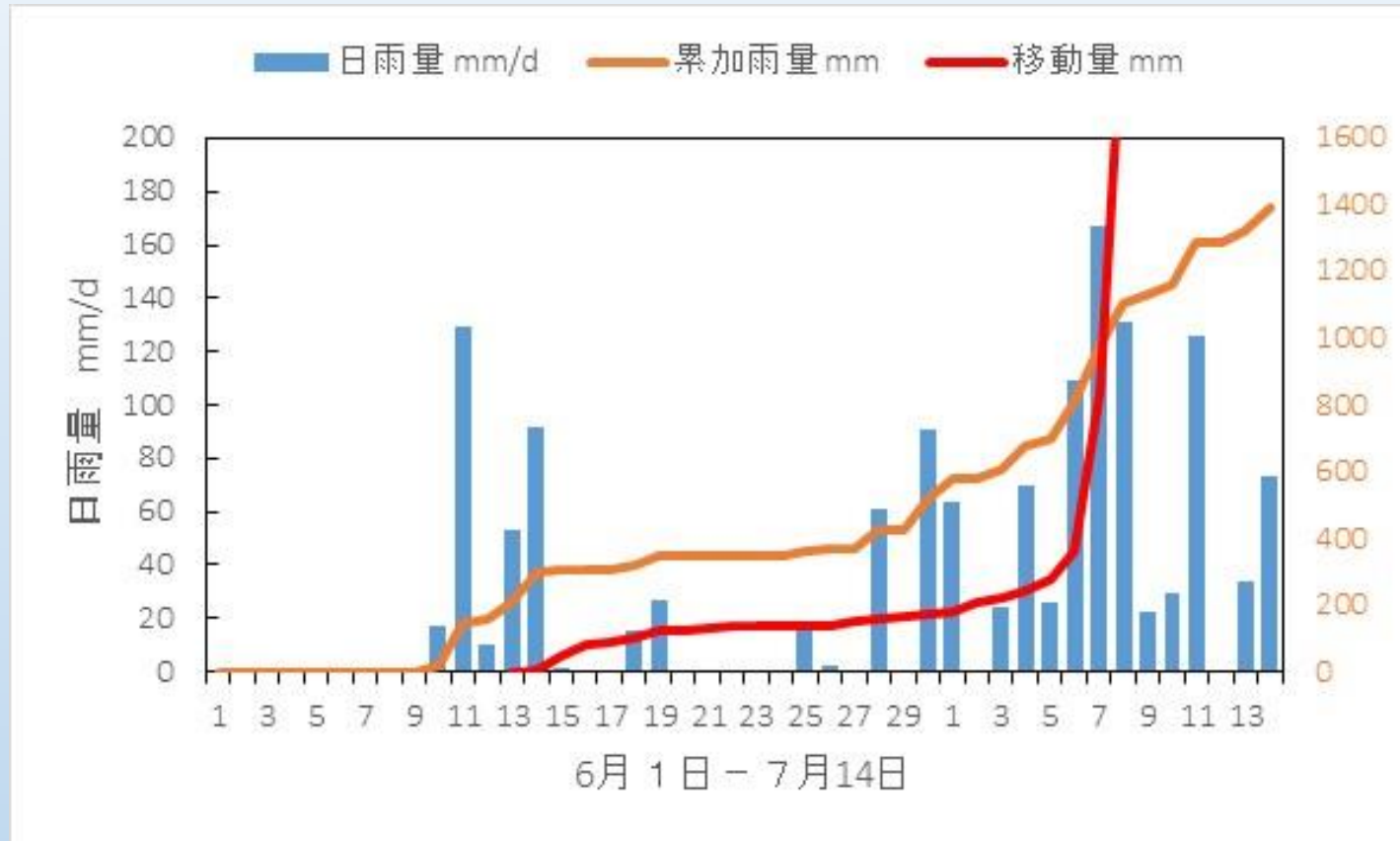
約165mm (25mm/d)

➤7月7-8日

約880mm (400mm/d)

➤7月8日9時30分頃

崩落



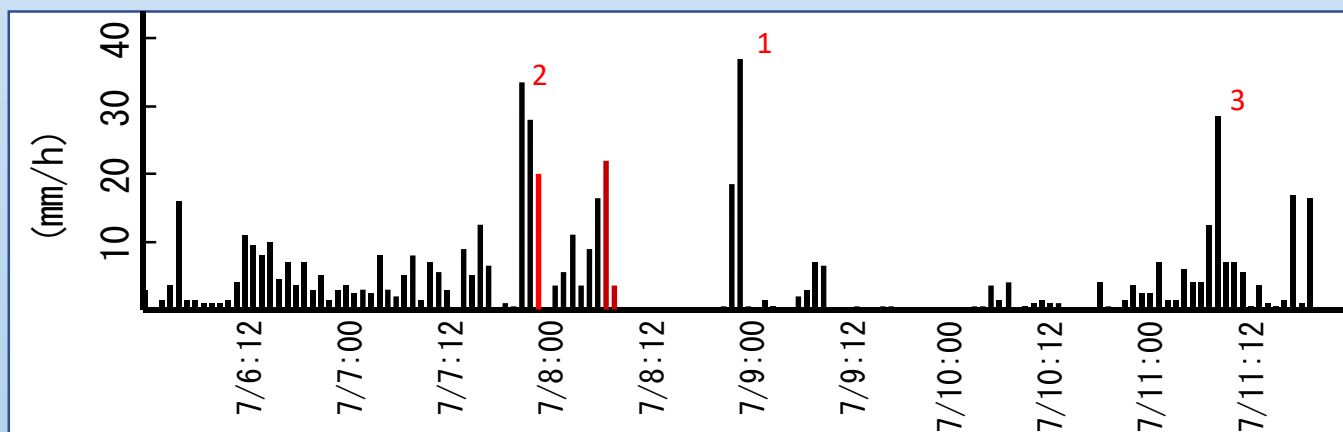
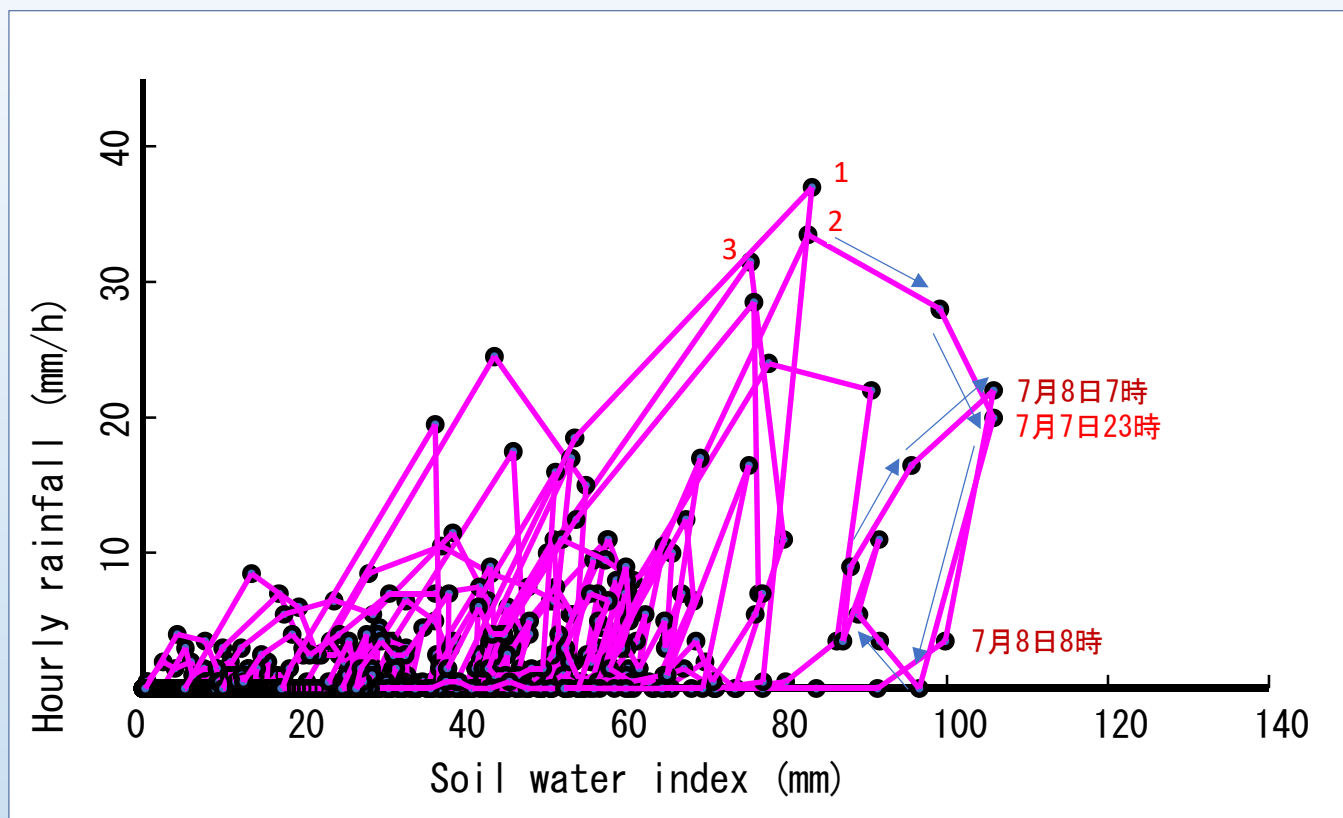
土壌雨量指数とスネークライン

➤ 6月10日から7月11日12時までの降雨を対象に土壌雨量指数の変化と移動実態を対比すると土壌雨量指数が最も大きくなる7日23時。移動量は7日から8日にかけての急激な増加し、8日9時半に崩落したので、土壌雨量指数の大きさにほぼ一致。

➤ 崩壊の原因

長雨の影響にともなう地下水の影響が大きいと考えられる。

➤ 崩壊直後の滑落崖には、横断方向に連続する湧水の流下が撮影されている。

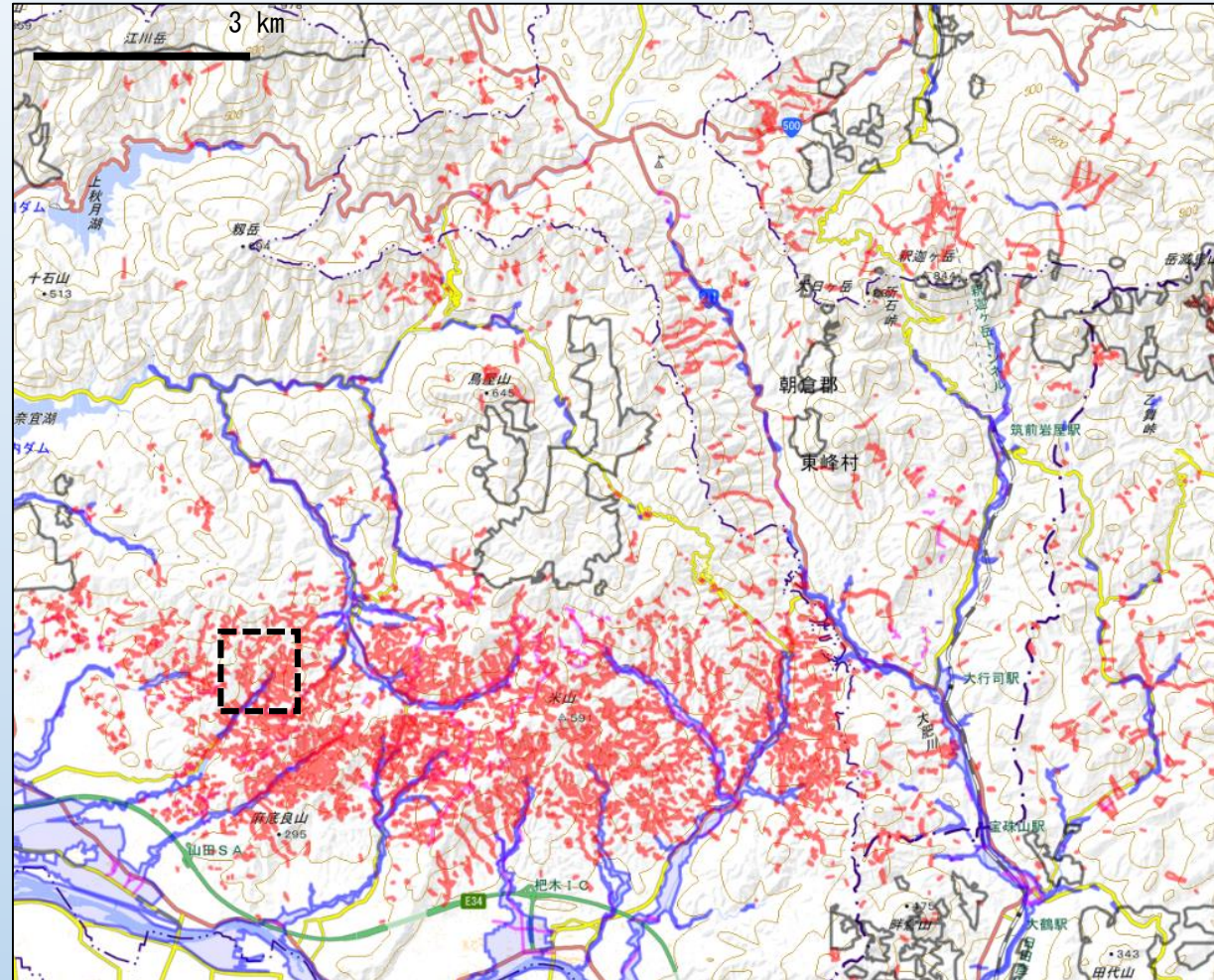


2017年7月九州北部豪雨による斜面災害

➤平成29年(2017)7月, 福岡県朝倉市を中心とする山間域で集中的な豪雨があり, 近年稀にみる斜面崩壊が高密度に発生した。最大24時間降雨量829mm(朝倉市黒川)という未曾有なもので, 多量の流木を伴う甚大な土砂災害となった。

➤この土砂災害の誘因は, 狭い範囲に集中的な強雨が継続して降ったことにあるが, 素因にはマサ土化した花崗岩類や風化の進んだ泥質片岩, 加えて火山性岩という脆弱な地質で覆われていることがあげられている。

➤また, 災害の社会的なインパクトとして, 林業が盛んな地方で森林域から多量の立木が流出し, 被害を拡大したことが注目される。



解析対象域 (国土地理院「平成29年7月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」より作成)

斜面災害の実態



平成29年(2017)4月13日撮影

妙見川流域, 奈良ヶ谷川流域とも, 崩壊地はほとんど見られない。



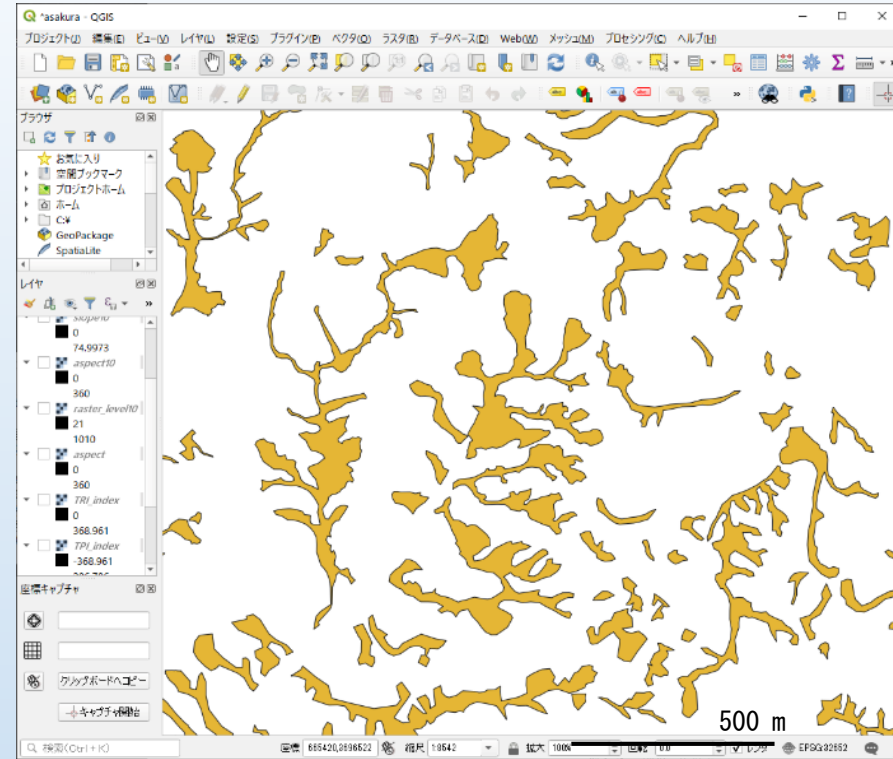
平成29年(2017)9月13日撮影

両流域とも, 多くの支流で崩壊が生じ崩土が本川に到達した様子が見られる。

九州北部豪雨に伴う被害状況判読図



奈良ヶ谷川流域の崩壊箇所（国土地理院UAV撮影，平成29年7月7日），崩壊地は単一ではなく複合的に発生・流下した様子が見える



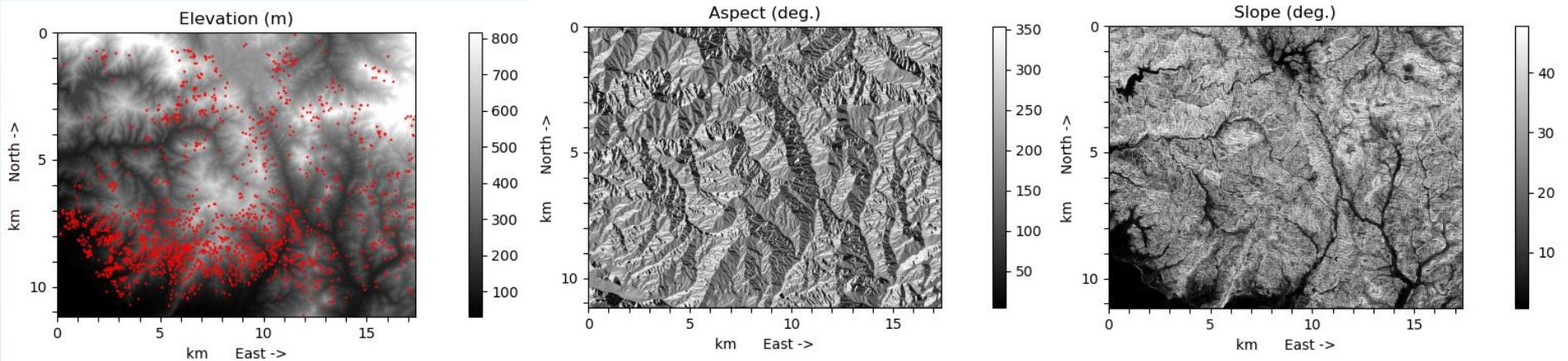
ポリゴン化された崩壊地の例（複数が一体としてポリゴン化されている）

➤国土地理院が作成した被害状況判読図は，豪雨で生じたと考えられる土砂崩壊地，道路損壊，鉄道損壊，洪水流到達範囲を空中写真等から判読したもので，1935個の土砂崩壊地が抽出されている。抽出された崩壊地は，ポリゴンとして境界座標と面積が整理され，一般的なGISソフトで閲覧可能なGeoJSONファイルで公開されている。

➤解析対象範囲は246.16km²の領域で，土砂崩壊地は1723個含まれる。なお，判読された土砂崩壊地は，長さ，幅が約50m以上の崩壊跡で，写真では区分できない複数の崩壊地と堆積地とが一体で抽出されている。

➤表示区域（右図の矩形域）の崩壊面積率は約16.5%（=478338/2904300*100）ときわめて高い値を示す。解析域内の崩壊地が密集する区域（横10kmx縦3km）もほぼ同様で崩壊深を1mと仮定すると約500万m³，2mで約1000万m³の新規土砂生産が見積もれる。

解析地の地形概要



解析対象域の**標高分布**（赤点は崩壊地ポリゴンの最高点位置を示す）

解析対象域の**斜面方向**（向き，真北：0で時計回り360度まで）

解析対象域の**斜面勾配**の分布

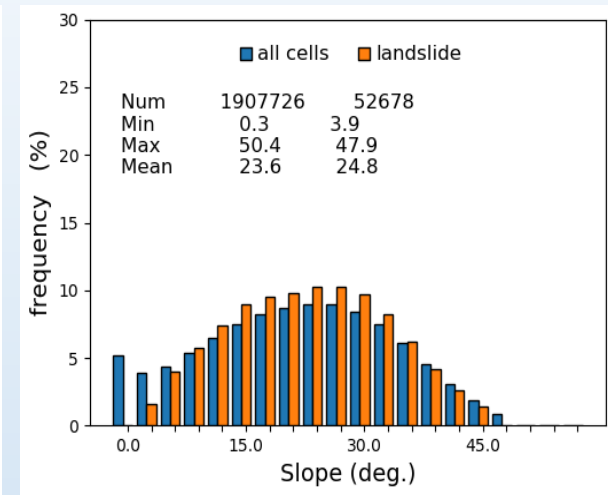
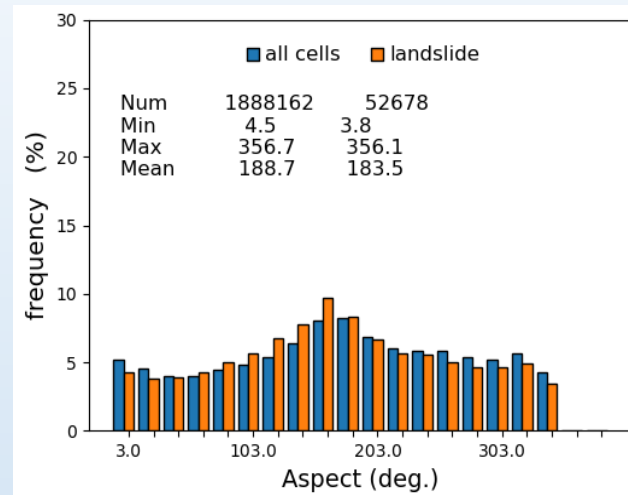
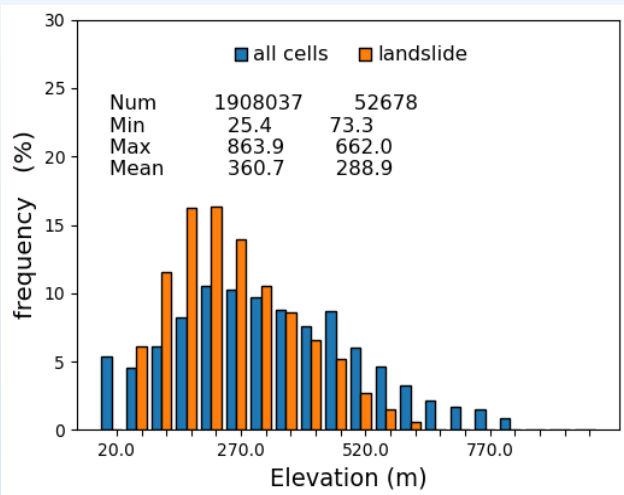
国土地理院10x10mメッシュの標高データを使用した地形解析。

➤ **崩壊地の高密度な分布域**は、標高分布とほぼ無関係に領域の右下域に長方形をなすように位置する。この高密度な分布域は、図の下端を右から左に蛇行する筑後川の北方山麓の**標高200～500mの範囲**である。図中の中央を南下する大肥川を境に、その東側では崩壊地は少なくなる。

➤ 谷と尾根を境に斜面の向きが異なることから、地形の特徴が良好に示されていることがわかる。図に示す**崩壊地の密集域**とそれ以外における斜面方向を比べると、**特徴ある傾向は見られない**。

➤ **崩壊地の密集域**とそれ以外の斜面勾配を比べると、**特徴ある傾向は見られない**。密集域の斜面勾配は、25～40度の範囲に含まれる。

土砂崩壊地の有無と地形因子



全セルと土砂崩壊地セルの標高分布の対比

全セルと土砂崩壊地セルの斜面方向分布の対比

全セルと土砂崩壊地セルの斜面勾配分布の対比

国土地理院10x10mメッシュの標高データを使用。

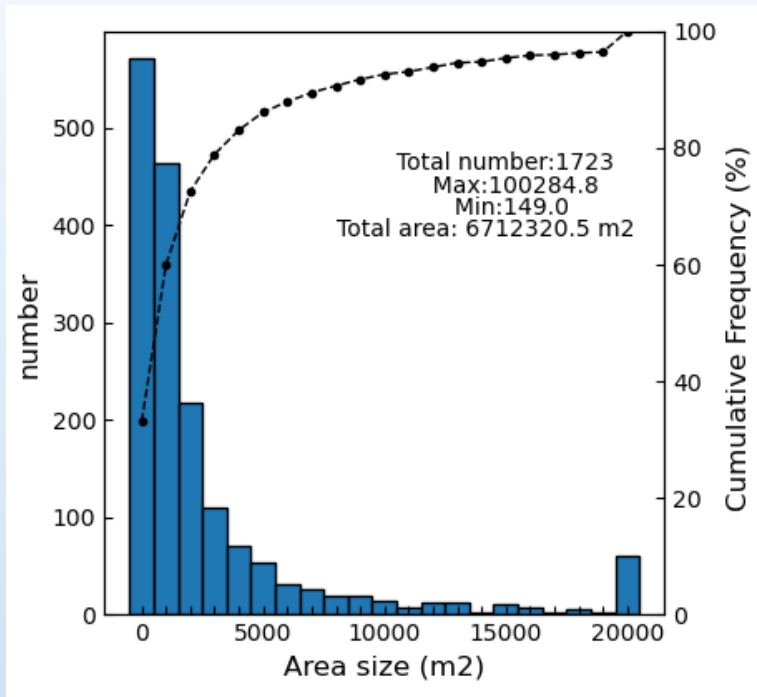
非現実的な数値が含まれることを避けるため、各因子データの1~99%を取り出し解析対象とした。

➤ 標高分布の対象全セルは1908037個、土砂崩壊地セル数は52678個である(崩壊面積率は2.8%)。一般セルは220~370mに多く、約40%が分布するが、土砂崩壊地セルは標高180~270m域で約45%がやや尖塔形に分布する。降雨量はこの標高ゾーンで多かったと推定される。

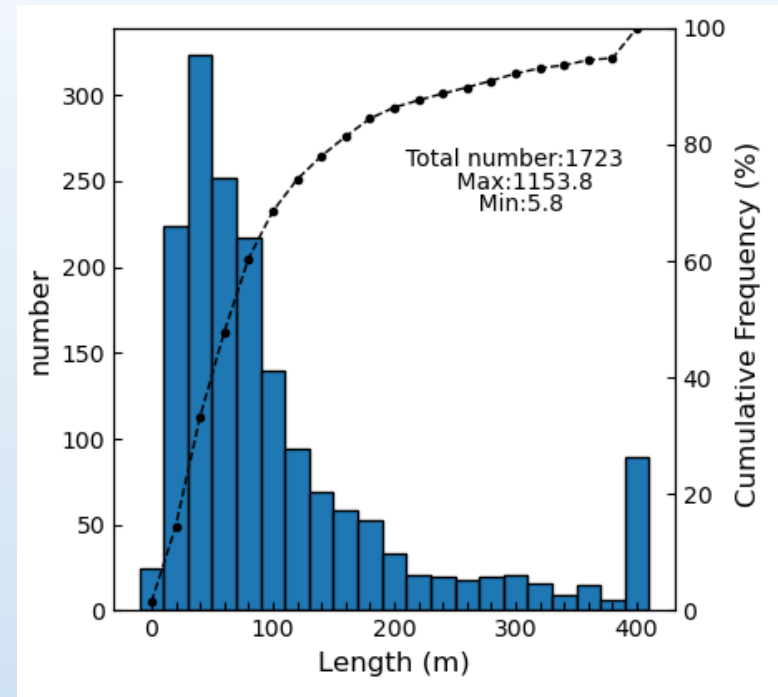
➤ 傾斜方向は、図に示すように真北から約180前後の南向き斜面が10%前後と他に比べて多い。この対比も、一般セルと土砂崩壊地のセルには違いがみられない。

➤ 斜面勾配を比べると、図に見るように特徴ある分布は見られない。崩壊地の多くは斜面勾配25~40度の範囲に含まれるようである。

土砂崩壊地の形態分布（1）



土砂崩壊地の面積の頻度分布

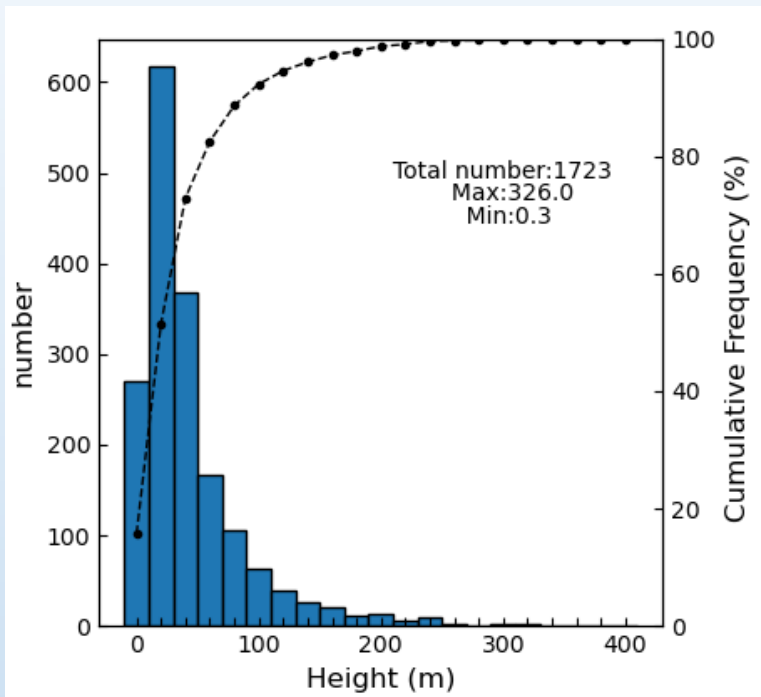


土砂崩壊地の水平距離の頻度分布

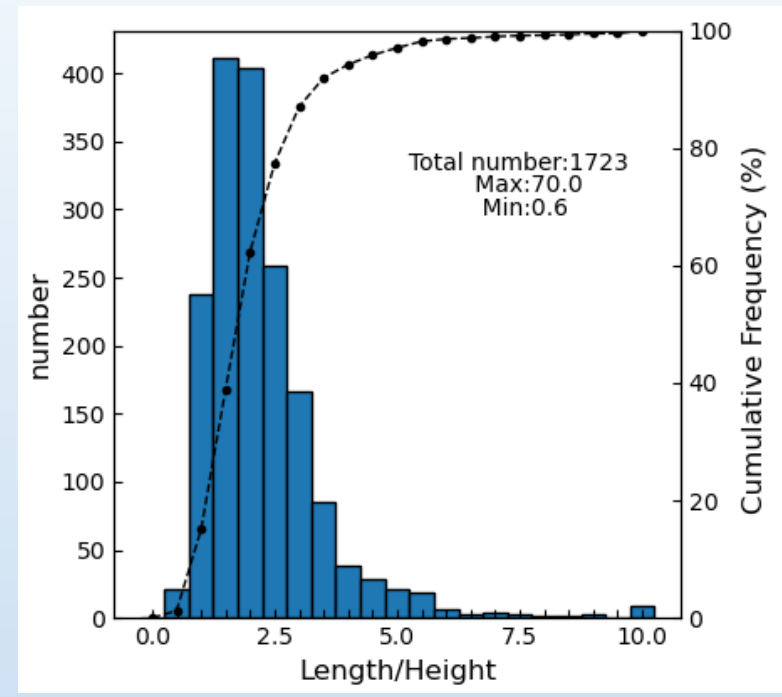
➤土砂崩壊地の面積は、面積 2000m^2 以下のものが約60%、 3000m^2 までを含めると70%強を示す。抽出された土砂崩壊地は、複数の崩壊地と堆積地とが一体で抽出されていることから、面積 3000m^2 としても、多くはその1/2~1/3程度と推察され、多くは小規模な表層崩壊と考えられる。ただし、面積 $10,000\text{m}^2$ のものが約10%、170個程度存在し、最大は $100,000\text{m}^2$ 以上である。深層型の斜面崩壊の発生も少なくなかったと判断される。

➤土砂崩壊地ポリゴンの最高標高セルと最低標高セルの距離を「水平距離」とすると、水平距離は、 100m 以下のものが約70%を占める。長さ 400m を超えるケースも100個程度みられ、最長では 1100m 超のものがある。これは崩壊土砂量の比較的少ない表層崩壊のほかに、多量の崩土を伴う斜面崩壊が長距離を流動したケースが相当程度あったことによると判断される。

土砂崩壊地の形態分布 (2)



土砂崩壊地の高さの頻度分布



土砂崩壊地の水平距離/高さ (L/H) の頻度分布

➤ 土砂崩壊地ポリゴンの最高標高セルと最低標高セルとの比高を「高さ」とすると、土砂崩壊地の高さは、60m以下が約70%で、90mでは約90%が含まれる。なお、最大の高さは326mであった。

➤ 得られた水平距離を l 、同高さを H として、 l/H 率の頻度分布を求めると、2.5倍で約80%弱、3.0倍で約90%が含まれる。「崖崩れ」の移動距離 L と高さ H の比率に比べ、 l/H 率は計測方法が異なるので単純な比較はできないが、比率の頻度分布は、大きく異なっていない。ただし、規模が大きな深層型の崩壊が含まれていることもあり、「がけ崩れ」よりも長い移動距離を有するものが含まれている。

九州北部豪雨災害の斜面崩壊の概要

国土地理院が作成した「平成29年7月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」を用いて、斜面崩壊の規模と発生場の特徴分析を行った。

- 解析領域内には崩壊地が密集する区域(横10km, 縦3km)があり, そこでの崩壊面積率は約16.5%と極めて高い。平均崩壊深を1mとすれば, 約500万 m^3 , 2mで約1000万 m^3 の土砂生産が見込まれること, また, 解析領域246.16 km^2 の崩壊面積率は2.8%を示し, 降雨に伴う一般的な崩壊面積率1%を大きく超える。
- 土砂崩壊地の面積は1000 m^2 以下で30%強, 2000 m^2 以下のものが約60%を占め, 3000 m^2 まで含めると70%強を示した。抽出された土砂崩壊地の多くは表層崩壊であったことが裏付けされる。
- L/H率は一般の「がけ崩れ」よりも大きく, 2.5で約80%弱, 3.0で約90%が含まれることがわかった。これには, 土砂崩壊地の抽出が複数の崩壊地を一体としていること, 規模の大きな深層型の崩壊が含まれていると思われる。
- 解析領域の地形因子, 標高, 斜面向き, 傾斜において, 土砂崩壊地とそれ以外の一般斜面で頻度分布を対比したところ, 両者の違いは見られなかった。斜面崩壊の発生は, 素因である地形が大きく影響したのではなく, 誘因である降雨によるものと推察される。つまりは, 外力である降雨による影響がきわめて大きな土砂災害であったともいえる。

土砂崩壊地の面的規模と斜面勾配による区分

当該域は、マサ土化した花崗岩類や風化の進んだ泥質片岩のほかに、火山性岩という脆弱な地質であり、風化は堆積岩地帯の表層よりも深いと予想される。これらを考慮し、抽出された土砂崩壊地について面積規模と斜面勾配で区分し、それぞれの形態的な特徴を把握する。

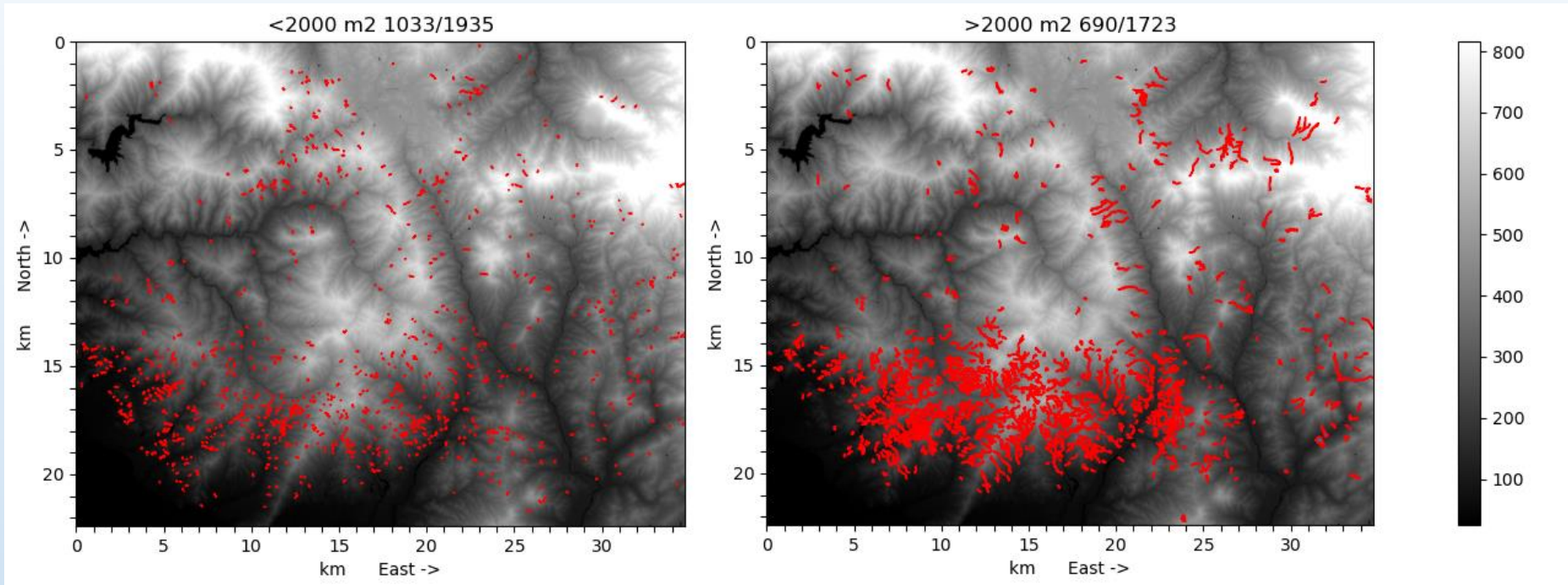
1. 面的規模

面積 2000m^2 以下を表層崩壊（土砂崩壊地ポリゴンは幾つかの崩壊を含む）、それ以上を深層的崩壊と区分した。

2. 斜面勾配

勾配 20° 以下を堆積地の特徴を含む土砂崩壊地、 20° 以上を崩壊地に近い特徴を有する土砂崩壊地と区分した。

土砂崩壊地の面的規模による区分



面積区分した土砂崩壊地の分布（左：面積2000m²以下，右：面積2000m²以上）

（国土地理院が作成した「平成29年7月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」および基盤地図情報・数値標高モデルを使用）

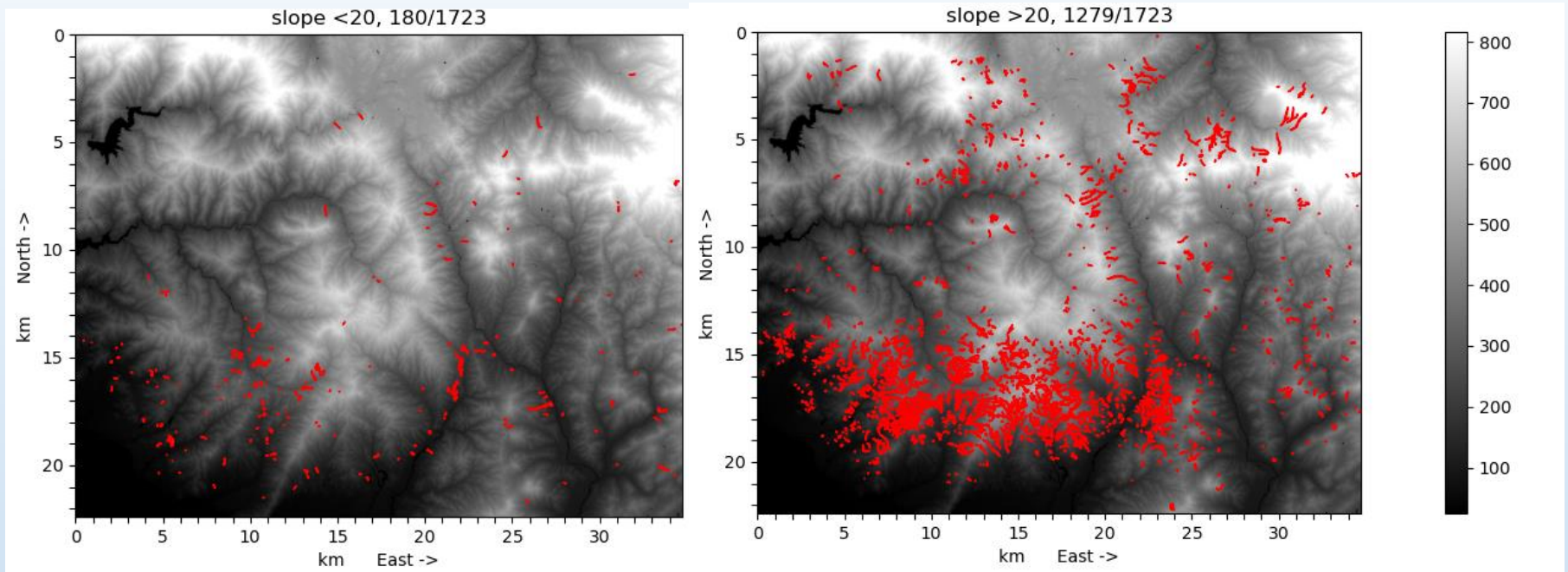
面積2000m²以下

対象域の全箇所1723個（面積合計、6,712,000m²）のうち1033個（面積合計、1,006,000m²）であり、個数は全数の約53%と半数以上を示すが、面積は全面積の約15%を占めるにとどまる。

面積2000m²以上

崩壊地個数は690個に減少するが、土砂崩壊地全面積の約85%、5,707,000m²と大部分を占める。

土砂崩壊地の斜面勾配による区分



斜面勾配で区分した土砂崩壊地の分布（左：ポリゴン勾配 20° 以下，右：ポリゴン勾配 20° 以上）

（国土地理院が作成した「平成29年7月九州北部豪雨に伴う被害状況判読図」および基盤地図情報・数値標高モデルを使用）

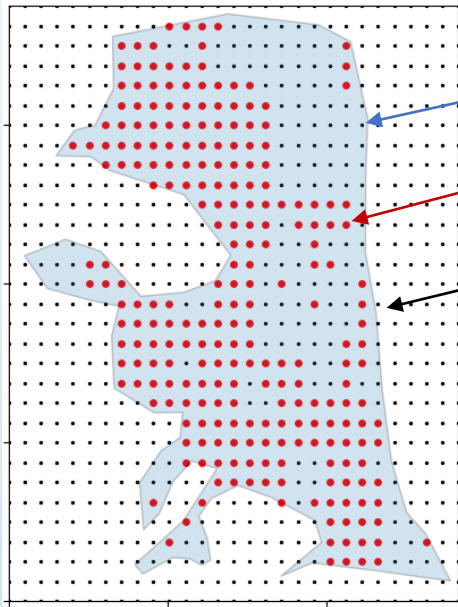
勾配 20° 以下

左図に示す勾配 20° 以下の土砂崩壊地は、**全箇所1723個のうち180個**で全土砂崩壊地の約10%を示すとどまる。

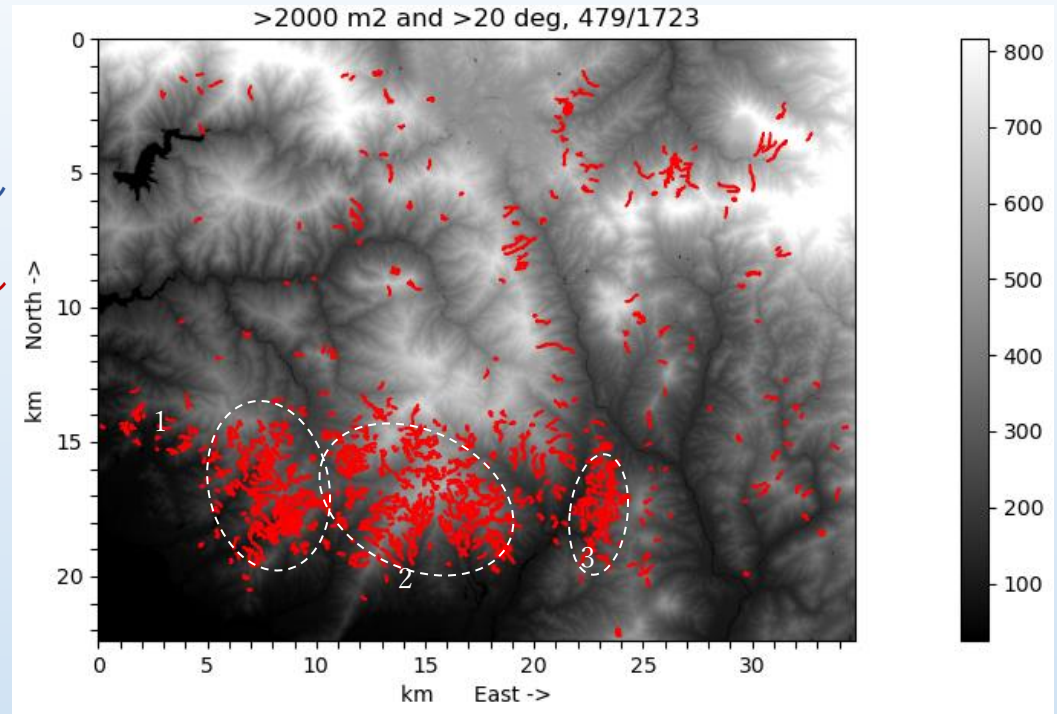
勾配 20° 以上

右図の勾配 20° 以上の場合は、**1279個**で約74%と多くを占める。→抽出された土砂崩壊地は、緩傾斜な堆積地に近いものではなく崩壊地に近い傾斜を有するものと判断される。

面積2000m²以上で勾配20° 以上の分布



土砂崩壊地ポリゴン



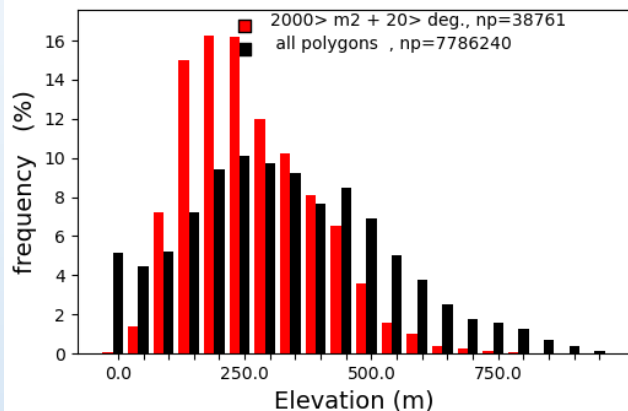
面積2000m²以上で勾配20° 以上の土砂崩壊地分布

面積2000m²以上で斜面勾配20° 以上

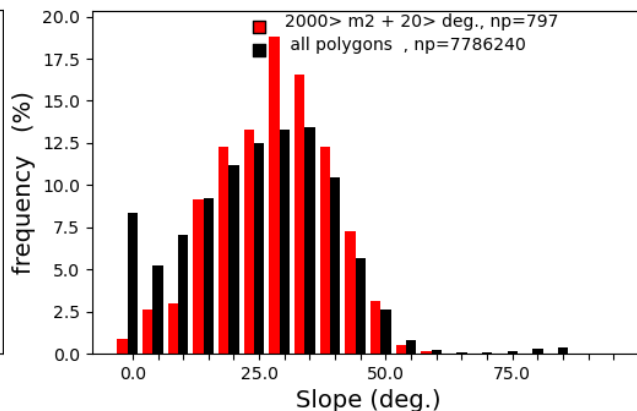
条件を満足する土砂崩壊地は、**479個**、**合計面積は4,282,000m²**。面積2000m²以上の場合から211個、面積で約**25%** (1,424,000m²) **減少**する。

その結果、集団で群状に分布する傾向がみられ、概ね3つのグループに分類される。グループ1は集落に近く、2は尾根から山腹が主体、3は山腹から溪流沿いの位置にある。

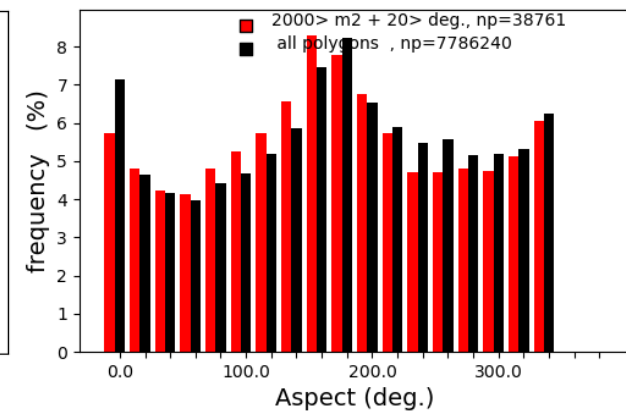
土砂崩壊地の面積2000m²以上，勾配20°以上の 標高，勾配，斜面方向の分布



土砂崩壊地と全セルの標高頻度分布



土砂崩壊地と全セルの勾配頻度分布



土砂崩壊地と全セルの斜面方向頻度分布

面積2000m²以上で勾配20°以上の土砂崩壊地セルの標高，勾配，斜面方向分布を領域内全セルの分布と対比

標高分布

全セルの標高頻度分布は250mを中心に，450m付近でやや大きくなり，その後標高1000mまで漸減する。一方，土砂崩壊地セルの頻度分布は，標高200から250mの区間で特異的に高く，この区間に約45%が集中し，先に示した3つのグループの多くはこの標高帯に含まれる。

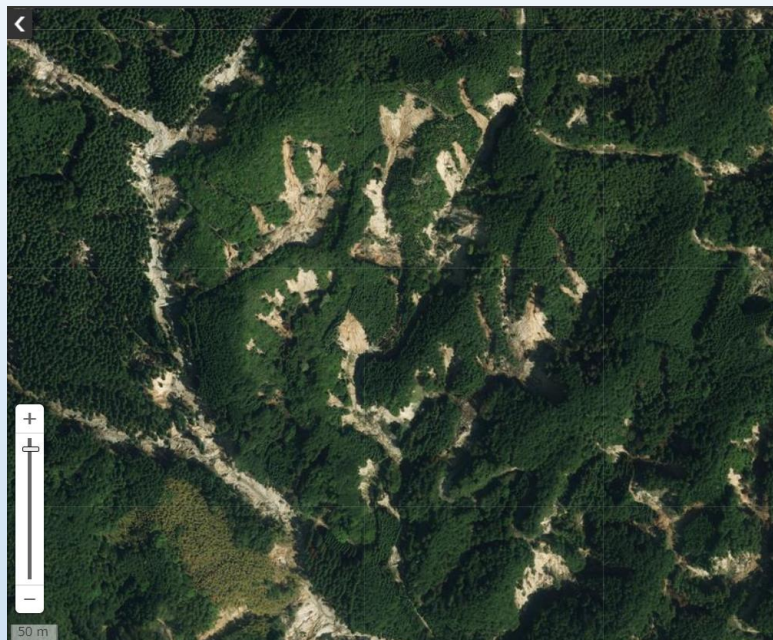
勾配分布

全セル頻度分布は30-35°を中心に，それ以降60°までは急激に減少する。土砂崩壊地セルの頻度分布もほぼ同型であるが，30から35°がやや突出し，この区間で約30%強を占める。

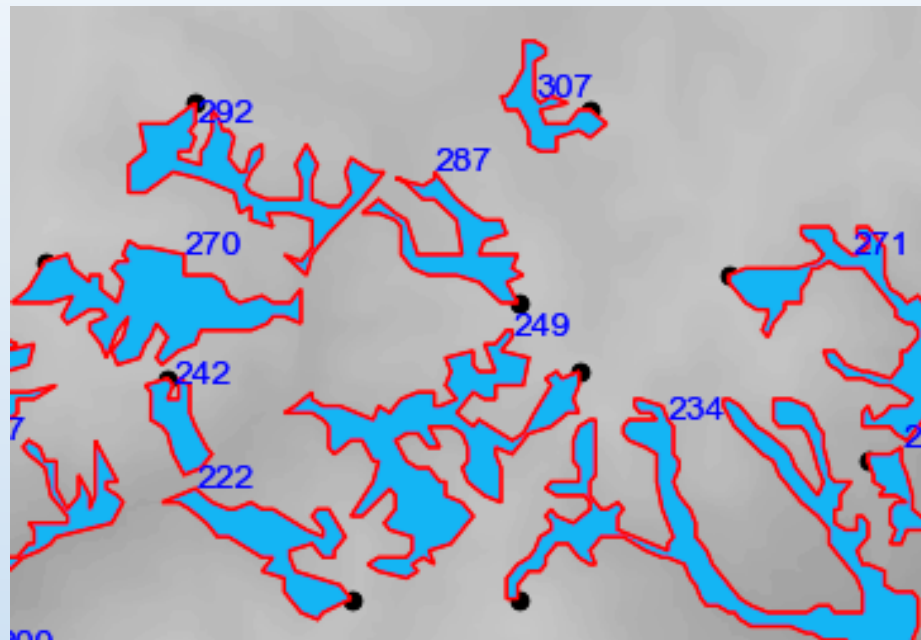
斜面方向分布

全セルと土砂崩壊地セルの斜面方向頻度分布は，違いは見られない。いずれも約180°前後の南向き斜面が10%弱で他に比べて多く，それ以外は5%程度で全方位に分布する。

土砂崩壊地の面積2000m²以上，勾配20°以上の冠頭部の地形



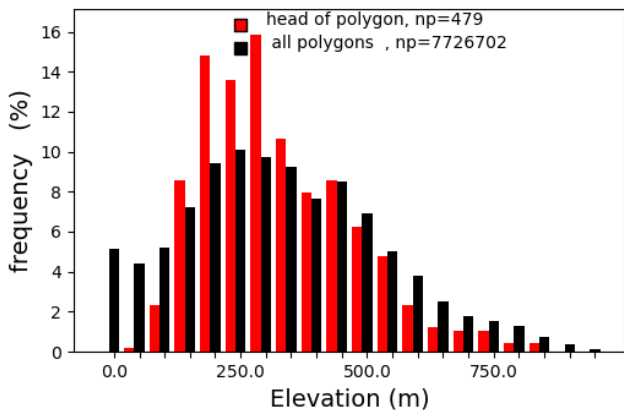
杷木白木地区上流の空中写真（国土地理院2017年7月13日撮影）



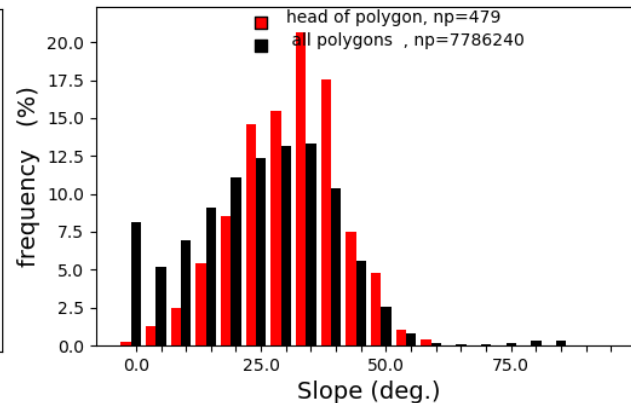
土砂崩壊地ポリゴン（数字はポリゴンのナンバー）と最高標高箇所（黒点）

面積2000m²以上，勾配20°以上の土砂崩壊地の冠頭位置は，どのような地形場に存在したかを把握するため，土砂崩壊地ポリゴンの最高標高を有するセルを抽出し，そこでの傾斜，標高，斜面方向の分布を全セルのそれらと対比する。

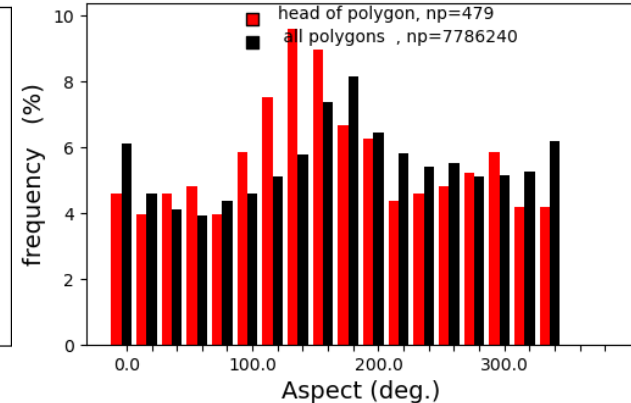
土砂崩壊地の冠頭部の地形



冠頭部セルと全セルの標高頻度分布



冠頭部セルと全セルの勾配頻度分布



冠頭部セルと全セルの勾配頻度分布

標高分布

冠頭部セルと全セルの標高頻度分布は、ほぼ同形で、面積2000m²以上で勾配20°以上の土砂崩壊地セルの標高分布に類似する（ただしピークは300mで、50m大きい）。

勾配分布

面積2000m²以上で勾配20°以上の土砂崩壊地と同様の分布傾向を示すが、勾配25から35°の範囲が突出する分布形状を示し、頭部セル全数の約67%を占める（土砂崩壊地の勾配分布よりも5°大きい）。

斜面方向分布

面積2000m²以上で勾配20°以上の土砂崩壊地と同様の分布傾向を示すが、土砂崩壊地が約180°で大きくなるのに対し、120から160°（南南東向きの斜面）で突出する様子が見られる。

豪雨が発生した当時、九州北部では対馬海峡付近にあった梅雨前線に向かって南海上の熱帯低気圧などから湿った空気が流入している（福岡管区气象台，2012）ことから、災害時には南南東斜面により多くの雨が降ったと推察される。

規模と勾配が大きい斜面崩壊の分布

平成29年7月の九州北部豪雨にともなう斜面崩壊を対象に、その分布に関する概要と、面的規模(2000m²)から、表層崩壊とそれ以外の深層的崩壊に区分した。また、斜面勾配20°を基準に急傾斜斜面を有する崩壊地を抽出し、各々の土砂崩壊地の発生場の特徴を示した。

- 1) 面積2000m²以上で勾配20°以上の土砂崩壊地は、479個、合計面積は4,282,000m²であった。対象域の土砂崩壊地は1723個、面積合計は6,712,000m²であるから、これらは、個数で約28%、面積で64%に相当する。
- 2) 抽出した土砂崩壊地の標高、勾配、斜面向きの分布は、①標高200-250mの区間で特異的に高く、約45%が集中すること、②勾配30-35°でやや突出し約30%強を占めること、③北から時計回りに約180°前後の南向き斜面が10%弱を占め、他に比べてやや大きいこと、がわかった。
- 3) 土砂崩壊地の冠頭部の分布は、①標高は、全セルの分布とほぼ同型であり、違いは見いだせないこと、②勾配は、勾配25-35°の範囲が突出し、土砂崩壊地頭部セル全数の約67%を占めること、③斜面方向は、北から時計回りに120から160°(南南東向き)の斜面が多くなることわかった。

解析領域の標高、斜面向き、傾斜において、抽出した土砂崩壊地とそれ以外の一般斜面で頻度分布を対比したところ、両者に大きな違いは見られなかった。斜面崩壊の発生は、素因である地形が大きく影響したのではなく、誘因である降雨による影響が大きいと推察される。今回のような豪災害では、斜面崩壊の発生位置を地形因子から特定することは難しいと思われる。

2018年中津市耶馬溪町の地すべり性崩壊

1. 発生概要

発生場所：大分県中津市耶馬溪町金吉，被害状況：死者6人，人家全壊4棟

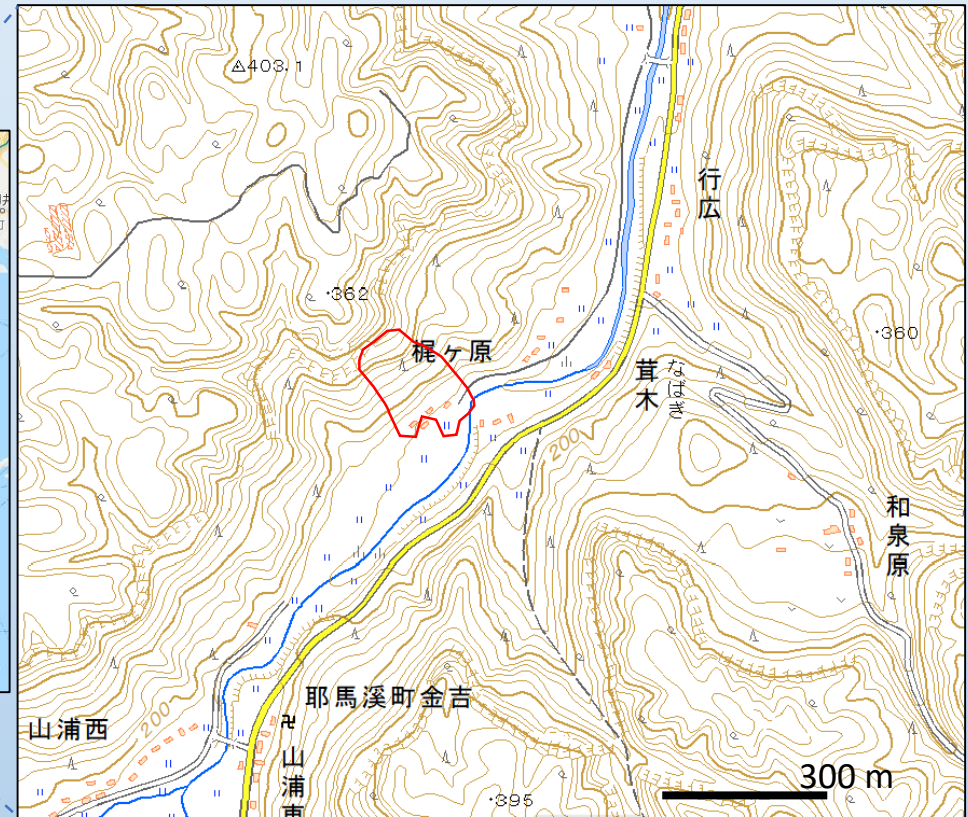
発生日時：平成30年（2018）4月11日（木）午前3時40分～4時頃

発生規模：幅約160m，水平長約220m，最大深さ約35m

雨量概要：3月降水量179mm（アメダス耶馬溪），3月平均降水量の1.24倍であるが，災害発生前2週間の降水量6mm）

2. 発生状況

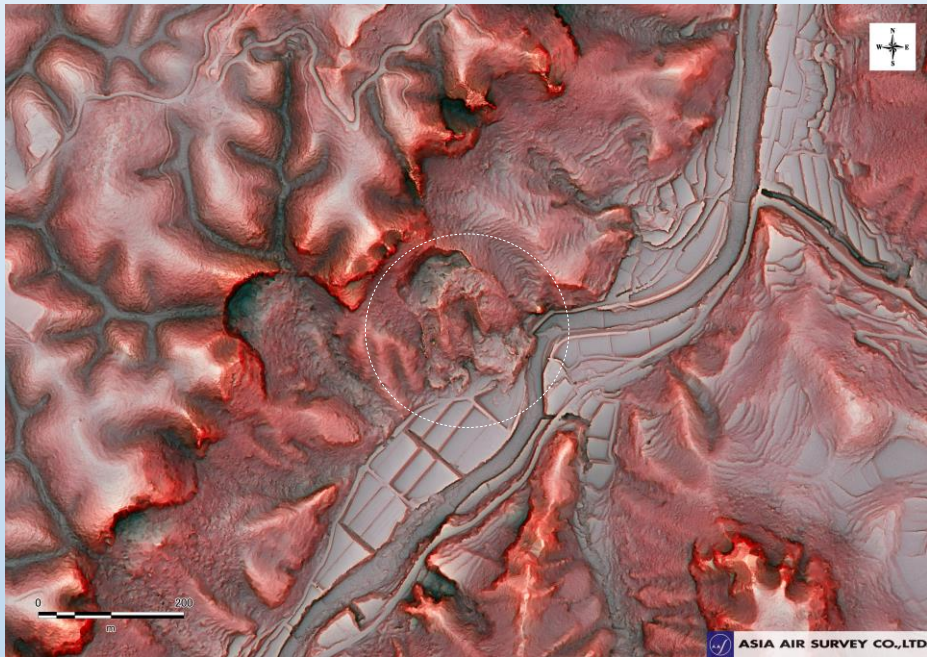
崩壊は2回発生した。1回目は右側ブロック側から土砂が流下，続いて左側から土砂が流下した。崩壊は崖錐が堆積した緩斜面で発生，斜面下部は岩盤が分布し急傾斜をなす。



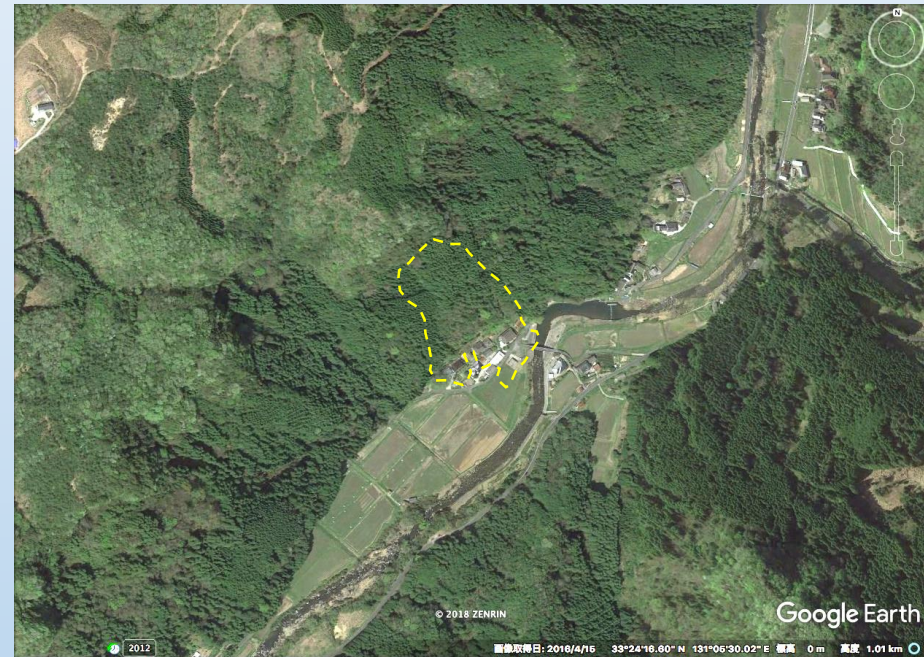
崩壊地の地質・地形

崩壊地の地質と地形

- 災害箇所の地質は約100万年前に噴出した耶馬溪火砕流堆積物（溶結凝灰岩層）が水中堆積層を挟み、約300万年前の新期宇佐火山岩類（熱水変質を受けた凝灰角礫岩層）を覆っている。
- 崩壊地は火砕流台地の縁辺部に位置し、上部：急崖（溶結凝灰岩）と中部：緩斜面、下部：急斜面に区分される。このような地形的な特徴は周辺山地にも認められる。
- 下部斜面は急勾配をなす谷地形を呈しており、中間から常時湧水が見られる。湧水は無降雨時にも枯渇することなく、上流側に豊富な地下水があることを示している。



災害後（2018年4月12日）



災害前（2016年4月16日）

崩壊地内（2018年7月9日撮影）



下端から見る全景



崩壊地右側斜面のスギ林と溶結凝灰岩の大径礫



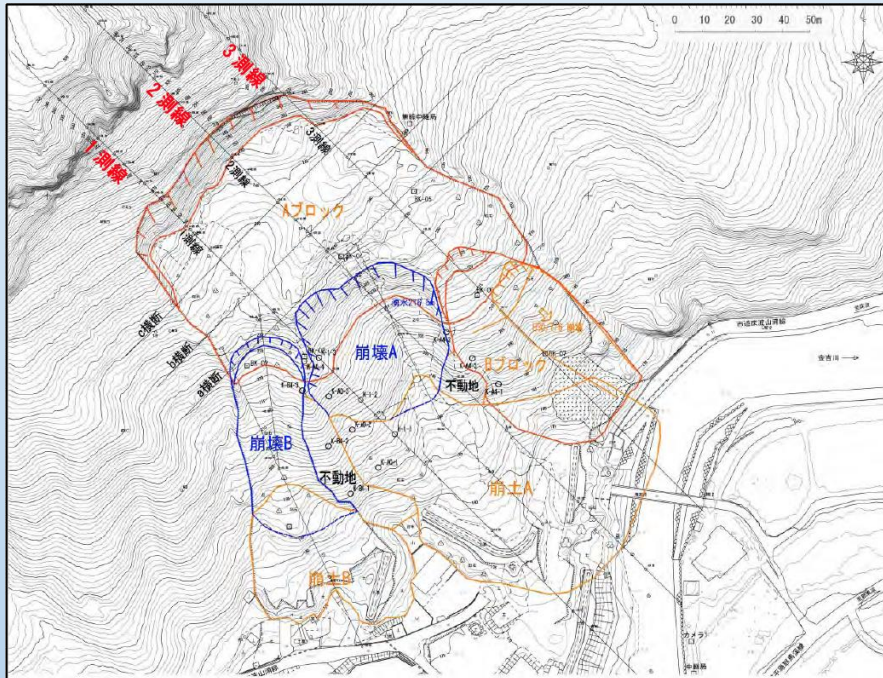
滑落崖に見える溶結凝灰岩と水中堆積物



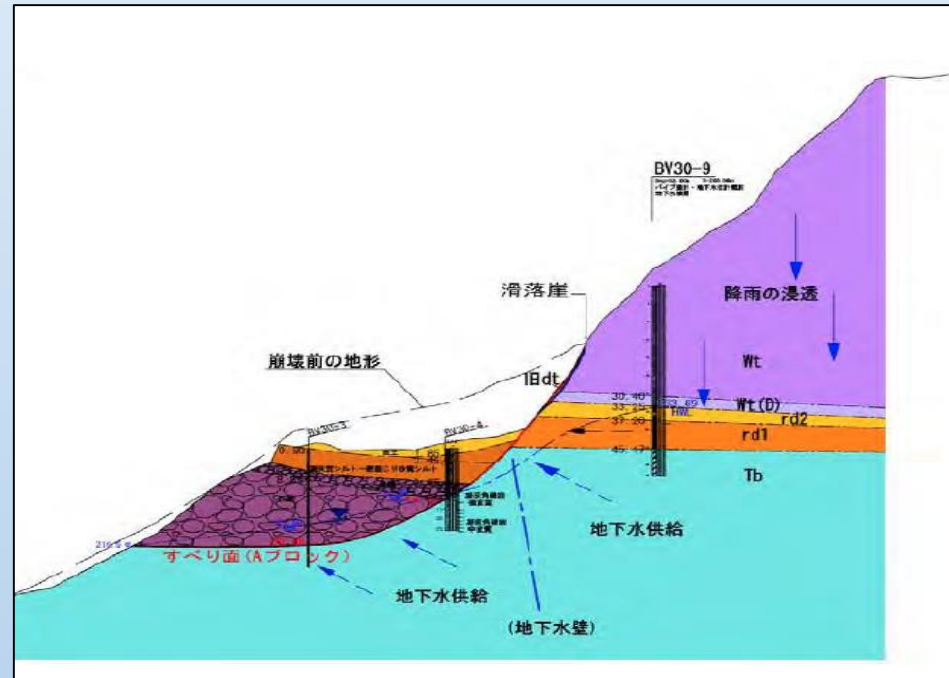
崩壊中腹から下流側（凝灰岩地盤，湧水がある）

崩壊の要因

- 耶馬溪火砕流堆積物の噴出以降、金吉川の下刻で溶結凝灰岩、水中堆積層、凝灰角礫岩からなる急崖斜面が背後斜面から地下水供給をうけたこと、これによる風化で斜面の安定度が低下し、大規模な崩壊が発生したと推定される。
- 崩壊斜面に残積していた溶結凝灰岩巨礫層に崩土等が崖錐状に堆積し、今回の崩壊前地形を形成したと考えられる。
- 背後斜面からの地下水供給等で凝灰角礫岩上面で円弧状すべりが発生した。これにより落差の大きい滑落崖が形成され、溶結凝灰岩の巨礫を含む大量の崩土が斜面下方に流出した。
- 崩壊土量は15-18万 m^3 と推定される。約5万 m^3 の土砂が崩土化し流動、Aブロックには8-9万 m^3 が残存した。



崩壊地の平面図とブロック区分



崩壊地の縦断図 (2測線)

耶馬溪町の地すべり性崩壊と対策概要

崩壊の原因と機構

➤ 崩壊の原因

崩壊地は上方斜面から地下水が集まりやすい地形で、長期にわたり地下水の作用を受けていたと考えられる。豊富な地下水により変質凝灰角礫岩の上面で風化が進み、スメクタイト含有量が増加し、土質強度は長期にわたり徐々に低下したことが考えられる。

➤ 崩壊の機構

豊富な地下水と土質の低下が相互作用し、すべりに対する抵抗が弱まった結果、変質凝灰角礫岩の上面をすべり面とする崩壊（地すべり）に至ったと考えられる。近年では、地表の大きな変動が確認されていないことから、崩壊を事前に予測することは困難であった。

対策工の計画

➤ 応急対策

滑落崖直下では、ボーリング暗渠工により地下水位を低下させながら、末端部に防護柵や大型土のうを設置し河川等への土砂流出を防ぐ。崩壊地の活動について監視体制を整え、警戒避難対応を実施する。

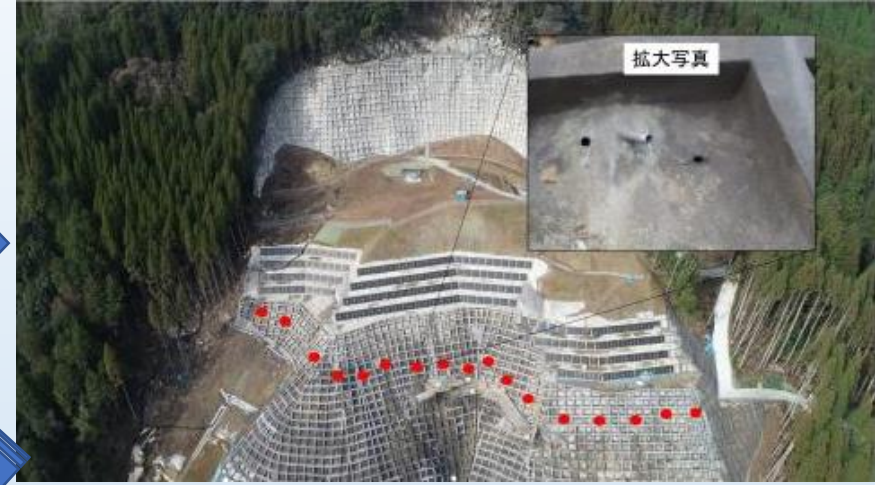
➤ 恒久対策

落石発生ゾーンは、ロープ伏工・覆式落石防護網工により転石の固定を図る。滑落崖ゾーンは、法枠工・鉄筋挿入工により崩落の防止を図る。中央部ブロックには、集水井で地下水を低下させるとともに安定性を高めるためにアンカー工で土塊を抑止する。末端部は、土留工により、不安定土塊の移動防止を図る。

災害復旧・対策工



滑落崖の整形と法枠工設置，Aブロックでアンカー工3段，Bブロック4段施工（令和元年7月終了）



地すべりブロック内のボーリング暗渠工が完了（令和元年12月終了）



Aブロック内の集水井2基施工（令和元年12月終了）



地すべり斜面下部の法枠工完了（令和2年）