

広島地域における地質・地形・降水と表層崩壊の分布対応

松四 雄騎¹

¹ 京都大学防災研究所 地盤災害研究部門 山地災害環境研究分野

E-mail: matsushi@slope.dpri.kyoto-u.ac.jp

広島地方を対象に、崩壊源の分布について、降雨、地質および地形の条件に着目して整理した。広島沿岸部では2018年7月3日から7日にかけての5日間で300 mm以上の降水があり、数千か所で土砂移動が生じた。総雨量と崩壊源の空間的な分布はおおむね対応しているが、崩壊源密度は総降水量と単純に相関するわけではなく、地質、地形、および降水強度と関連している。地質は主として花崗岩と流紋岩で構成されており、このいずれにおいても、3時間最大雨量が80 mmを超えると崩壊発生数が急増する。花崗岩と流紋岩では、流紋岩の方が閾値が明瞭である。崩壊源となった斜面は傾斜が15°~35°で平板型の斜面での崩壊が多い。斜面の勾配に依存した降雨閾値の差異は認められなかった。流域災害に対する減災の実現には、ハザードおよびリスクの時空間変化をリアルタイムで精緻に計算し、地域社会に定量的な情報を提供して、どのような危機が自身に迫っているのかを適時に、正確に、認識させることのできる仕組みが必要である。これは、極端気象災害に直面する地域社会の核心的な減災ニーズであり、分野横断的な研究者組織による学際的体制と複合融合的な研究アプローチをもって、はじめて実践的な解決を見出すことができるだろう。近い未来に、具体的なテストフィールドにおけるチャレンジを通じて、こうしたリアルタイム災害モニタリングシステムが構築・提供されてゆくことが期待される。

Key Words: shallow landslide, debris flow, granite, rhyolite, rainfall threshold

今回の豪雨では、中国地方の広い範囲で線状降水帯が複数個所に形成され、表層崩壊および土砂流による土砂災害が同時多発的に発生した。ここでは、発災場の中心となった広島地方を対象に、土砂流移動現象の源頭部の分布について、地形、降雨、および地質条件に着目して整理する。土砂移動現象の源頭部には、平板型の表層崩壊のほか、掃流および湧出による溪流内での土砂移動開始点を含む。ここでは、これを崩壊源と呼ぶことにする。解析に使用した崩壊源のインベントリは、広島大学（地理学グループ）がマッピングし、日本地理学会の災害報告として公開したデータをベースに、必要に応じて加筆したものをを用いている。

図1は、広島沿岸部における2018年7月3日から7日にかけての5日間の総降水量と崩壊源の分布を示している。今回の豪雨では、この領域全体に300 mm以上の降水があり、数千か所で土砂移動が生じた。降水は、南西からの水蒸気輸送によって生じ、風向に沿って延びる一連の低地と山地あるいは、地形的な高所の風背側で顕著な雨域が形成された。総雨量と崩壊源の空間的な分布はおおむね対応しているが、崩壊源密度は総降水量と単純

に相関するわけではなく、地質、地形、および降水強度と関連している。

図2は、崩壊源と地質の分布の対応を示している。解析対象領域の主たる地質は、白亜紀の花崗岩および流紋岩であり、両者ともこの地方の基盤を構成する代表的な地質体であるといえる。付加体や花崗閃緑岩の占める割合は全体に対して小さく、また、崩壊の発生も顕著でない。今回の豪雨では、花崗岩と流紋岩のいずれでも、多くの崩壊が発生した。解析対象内でマッピングされた崩壊源の数は、花崗岩領域で4033か所、流紋岩領域で2409か所である。崩壊源の密度は、同じ地質の中でも空間的な発生数に偏りがあるため、単純には計算できないが、流紋岩体からなる山地の一部で、相対的に崩壊密度が高い領域が出現した。

図3に崩壊源の分布と斜面勾配の対応を示す。地質毎の地形的特性として、花崗岩を基盤とする山地の方が細かく開析されて小起伏丘陵となっているのに対し、流紋岩からなる山地は、低地との比高が大きな山塊状の地形を呈し、山稜域に緩傾斜の侵食小起伏面がみられる場合が多い。これは、花崗岩と流紋岩の風化帯および流

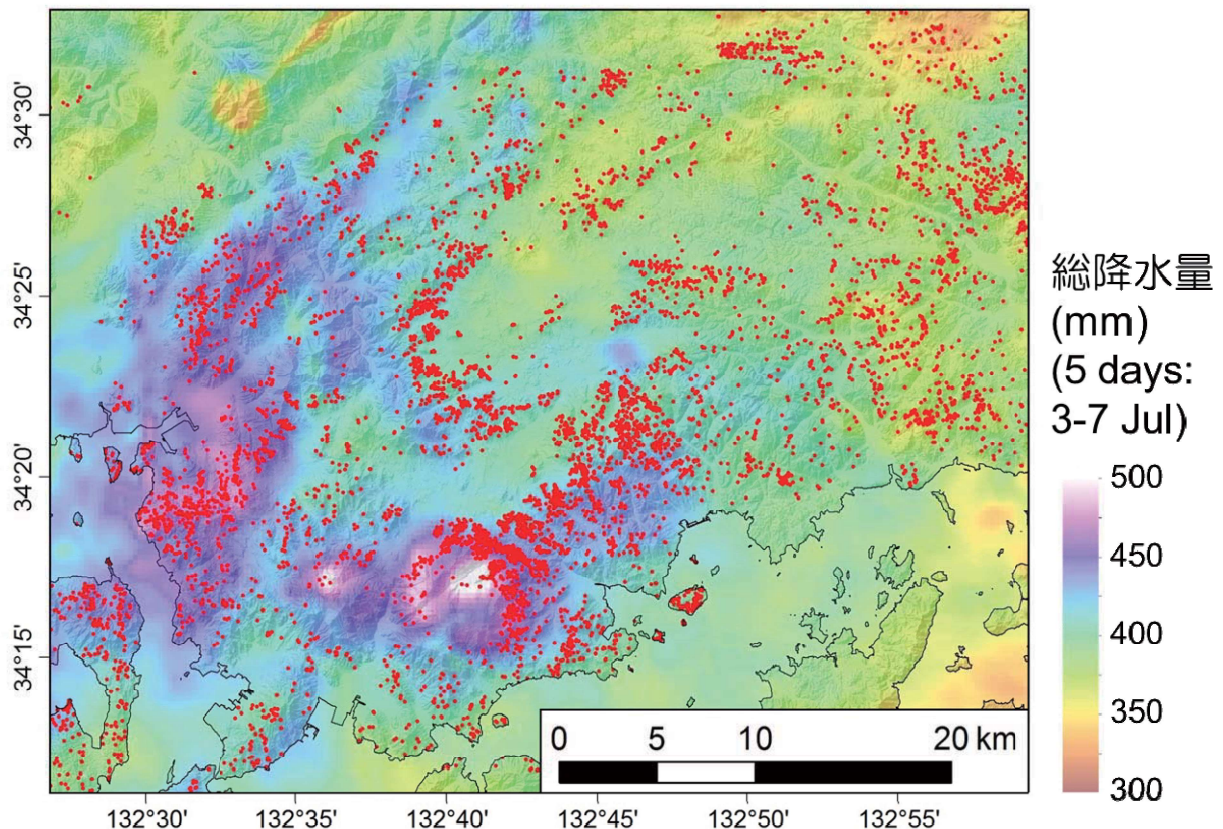


図 1. 広島沿岸部における総降水量（背景色）と崩壊源（赤点）の分布。降水データは XRAIN による。

域地形の発達特性によるものと考えられる。すなわち、基本的に花崗岩の方が、岩石としての構造からみて深部まで風化を受けやすく、また、新鮮岩盤が露出した条件下での風化速度も速いものと推測される。その結果、花崗岩の流域は侵食基準面の低下に従って山間の小河川が速やかに下刻し、斜面はそれに追従するように侵食される。一方、流紋岩山地では河床を構成する岩盤の風化が進行しにくいために下刻が進まず、侵食に伴って斜面が急勾配となる場所は山体の縁辺部や節理沿いに限られている。

斜面崩壊の発生場も、こうした岩質毎の地形特性に規定されているようである。花崗岩の山地では多くの崩壊源が流域の源頭部に位置し、稜線付近から土砂移動が生じているのに対し、流紋岩の山地では山稜部の小起伏面上に崩壊源はみられず、流域内の遷急線の直下を起点として土砂移動が生じている場合が多い。こうした崩壊源の位置に関する特徴は、各地質を基盤とする斜面での風化帯の発達状態とそれに制約された斜面水文過程に規定されているのではないかと考えられる。この仮説は、今後の継続的な地盤構造調査や水文観測などによって検証されるべきであろう。

崩壊源となった斜面の地形に着目すると、花崗岩と流紋岩でそれほど大きな差異はみられない。10 m メッシュの基盤地図情報に基づく地形解析によれば、いずれの地質でも崩壊した斜面の傾斜角は、 $25\text{--}30^\circ$ を最頻値として $15\text{--}35^\circ$ の範囲にその大部分が入る分布をもつ（図 4A）。また局所的な曲率も、0 付近に最頻値をもち、平板型の斜面で多くの崩壊が発生している（図 4B）。一般に、崩壊源の地形量が類似していることは、斜面構成物の力学的な特性や崩壊に至る機構が類似していることを示唆しているが、結論を出すには、今後より詳細な調査が必要である。発災前後の航空レーザー測量で得られた高解像度・高精度の地形モデルを分析することで、より精密な地形情報の解析を行うべきであるし、各地質の斜面で採取した試料の土質試験に基づく物性の比較も重要であろう。

次に、崩壊源における降水の強度について、地質毎の比較を行う。花崗岩と流紋岩の崩壊源の位置に供給された降水について、X バンド MP レーダに基づく 10 分雨量を任意の時間数で積算し、その最大値を求めた。図 5 は、崩壊源において観測された 1, 3, 6, 14 時間最大雨量について出現頻度を示したものである。この

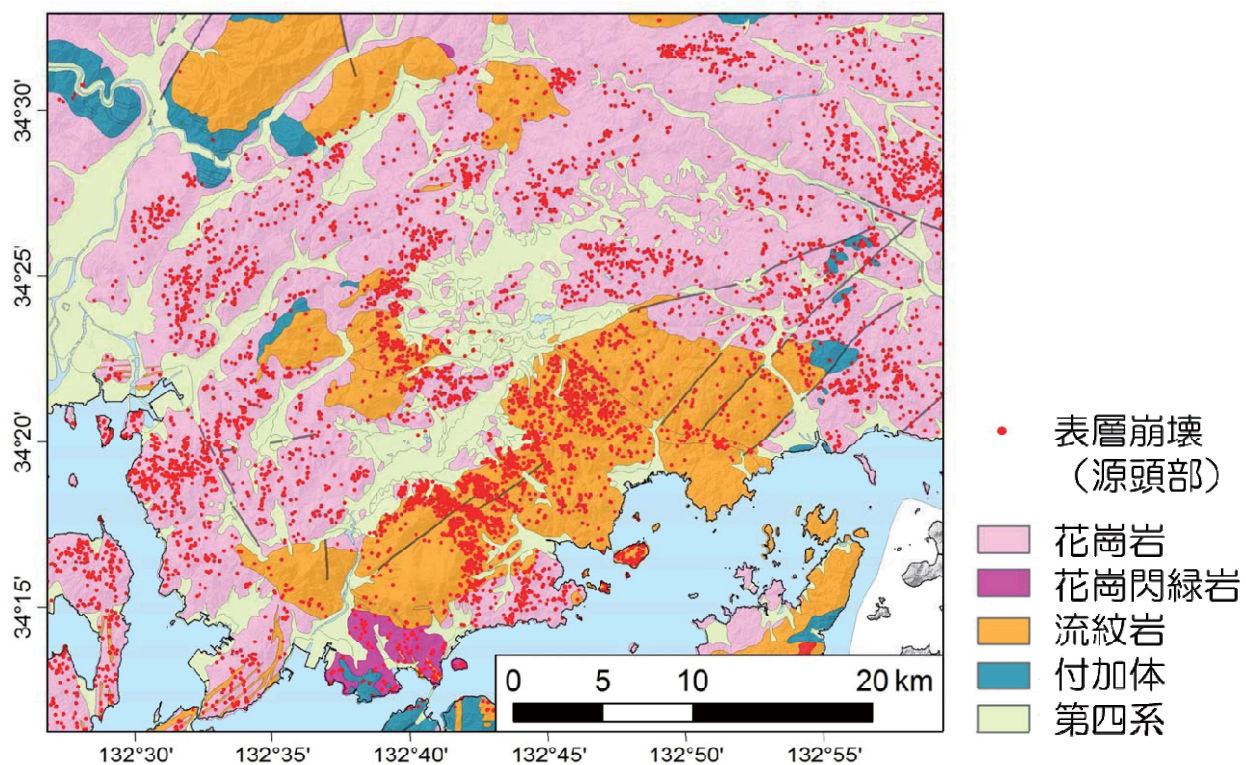


図2. 広島沿岸部における地質と崩壊源の分布. 地質は20万分の1シームレス地質図による.

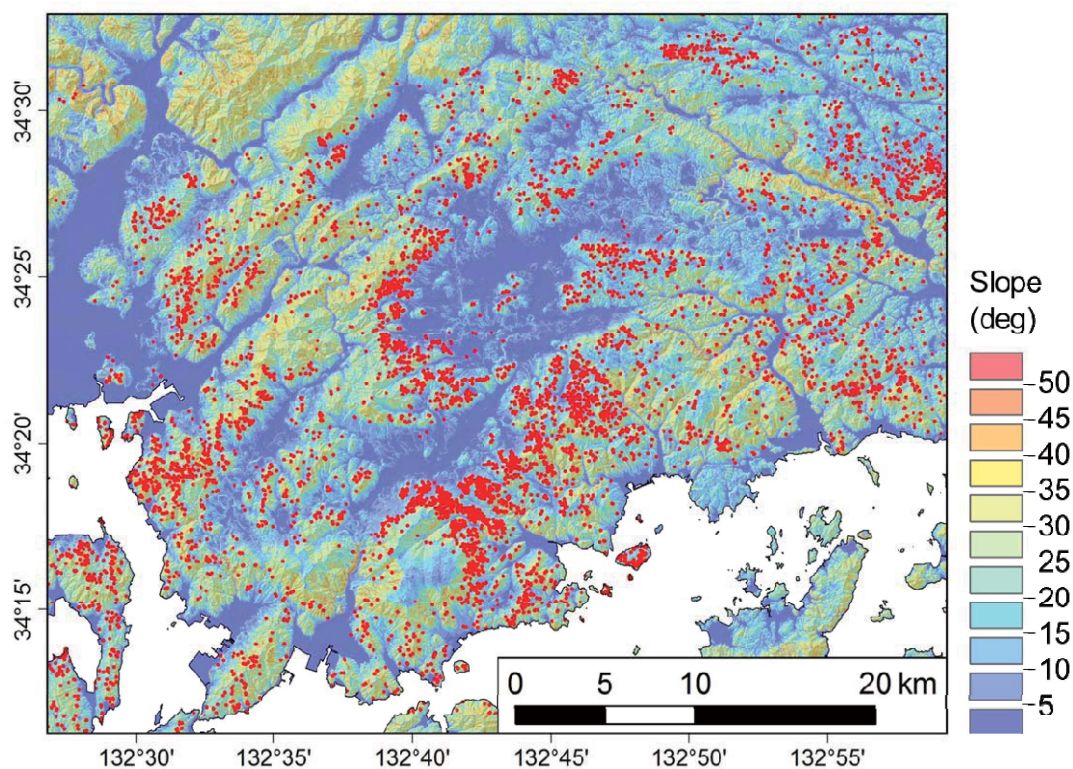


図3. 広島沿岸部における地形（斜面傾斜）と崩壊源（赤点）の分布. 地形は10mメッシュ基盤地図情報.

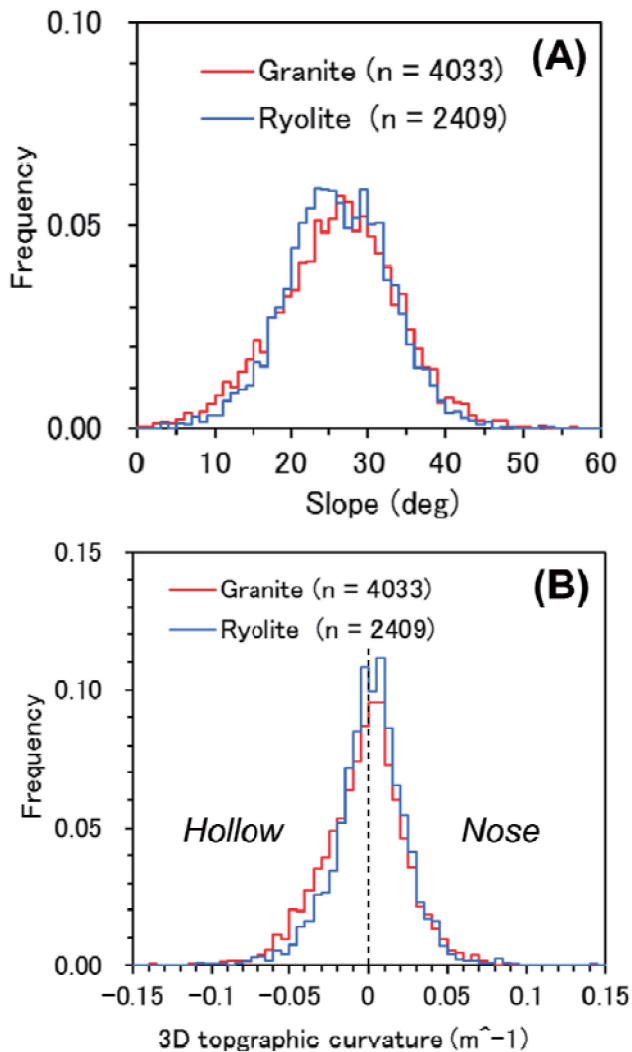


図 4. 花崗岩あるいは流紋岩を基盤とする斜面の崩壊源における勾配 (A) と地形曲率 (B) .

ヒストグラムにおいて、数値が小さい側の形状が鋭く切り立っているほど、その継続時間での降水強度について崩壊に対する閾値が明瞭であることを意味する。図 5 をみると、花崗岩と流紋岩のいずれにおいても、1 時間以下や 12 時間以上といったごく短期あるいは長い時間スケールでの最大雨量では、崩壊をもたらす閾値は明瞭でない。一方、3 時間最大雨量をみると、80 mm を超えると崩壊数が急増するのがわかる。花崗岩と流紋岩では、流紋岩の方が閾値が明瞭である。

ただし、このヒストグラムの形状は、そもそも各地質地域にどのような降水がもたらされたのかに依存する。そこで、3 時間最大降水量について、両地質に降った雨のヒストグラムとの比較を行った (図 6) 。ここでは、この母集団としての降水出現頻度は、X バンド MP レーダの空間解像度である 250 m 四方の各メッシュのデータを用い、崩壊源における降水は、その点の周囲 4 方に位

置する 250 m メッシュの値を内挿補完して用いている。図 6A をみると、今回の降雨イベントにおける 3 時間最大雨量は、花崗岩域では 50–140 mm、流紋岩域では 50–110 mm の範囲に分布している。花崗岩の崩壊源に降った雨は、この母集団の分布と、大きくは変わらないようにみえる (図 6B) 。一方、流紋岩の崩壊源での雨は、母集団の分布に比べて 80 mm/3h 以下の分布がほぼ無く、80 mm/3h 付近を境界にして急増する特徴を有する。この雨量を閾値として、土砂移動が急増することを意味している。

こうした崩壊に対する降雨閾値の特性は、地質毎の土砂移動発生機構の際を反映しているかもしれない。図 6 のヒストグラムをみるかぎりでは、花崗岩斜面のほうがより少ない雨でも土砂移動が発生するケースがあることが示唆される。これは、降雨浸透を主たる原因とする表層崩壊のほか、集水に伴う掃流や湧出に伴う土砂移動現象が発生しやすいことによるのかもしれない。ただし、写真測量に基づく 10 m メッシュ程度の空間解像度では、崩壊源の局所的な地形には地質による差異が無いようにみえる (図 4) ので、現地での多数の崩壊源の形態観察などによる確認が必要である。

3 時間最大雨量と崩壊源の空間的な分布をみると、南西–北東方向に帯状に分布域が伸びる平面的な特徴がよく一致している (図 7) 。ただし、当然ながら崩壊が発生するかどうかは地形 (特に勾配、cf 図 3) にも依存するため、降水が十分であっても崩壊源が分布しない場所がある。また、地質分布 (図 2) に照らしてみると、花崗岩を基盤とする場所に関しては、主として北東部において 3 時間最大降水量が小さい条件においても崩壊源がまばらに分布している。これらの場所では、より短い、あるいは長い時間スケールでの降水が効いているか、たとえ降雨強度が小さくとも、集水によって土砂移動が発生しうる状態になっていた可能性がある。

一般に、流紋岩には冷却亀裂などが多く存在し、基盤岩の貯水容量が大きいと推測できる。そのため、土砂移動が生じるには、強い降水浸透による表層崩壊の発生が必要条件となっているのではないかと推察される。一方、花崗岩は、節理もあるものの、風化フロント以深では、岩盤の水貯留量は大きくない。また、風化生成物の透水性も一般に高い。よって、十分な降水があれば、地形に従う側方流動による集水が顕著に生じ、飽和地表流や湧出水によるガリー状の侵食が発生することが多いのではないかと推察される。土砂移動現象に対する警戒のために降雨閾値を設定する際には、まずはこうした基盤岩の性状に依存した、流域内での現象の多様性に注意すべきであろう。

次に、斜面の地形的な条件ごとに、土砂移動を発生させる降雨閾値に差異があるかどうかを検証してみる。

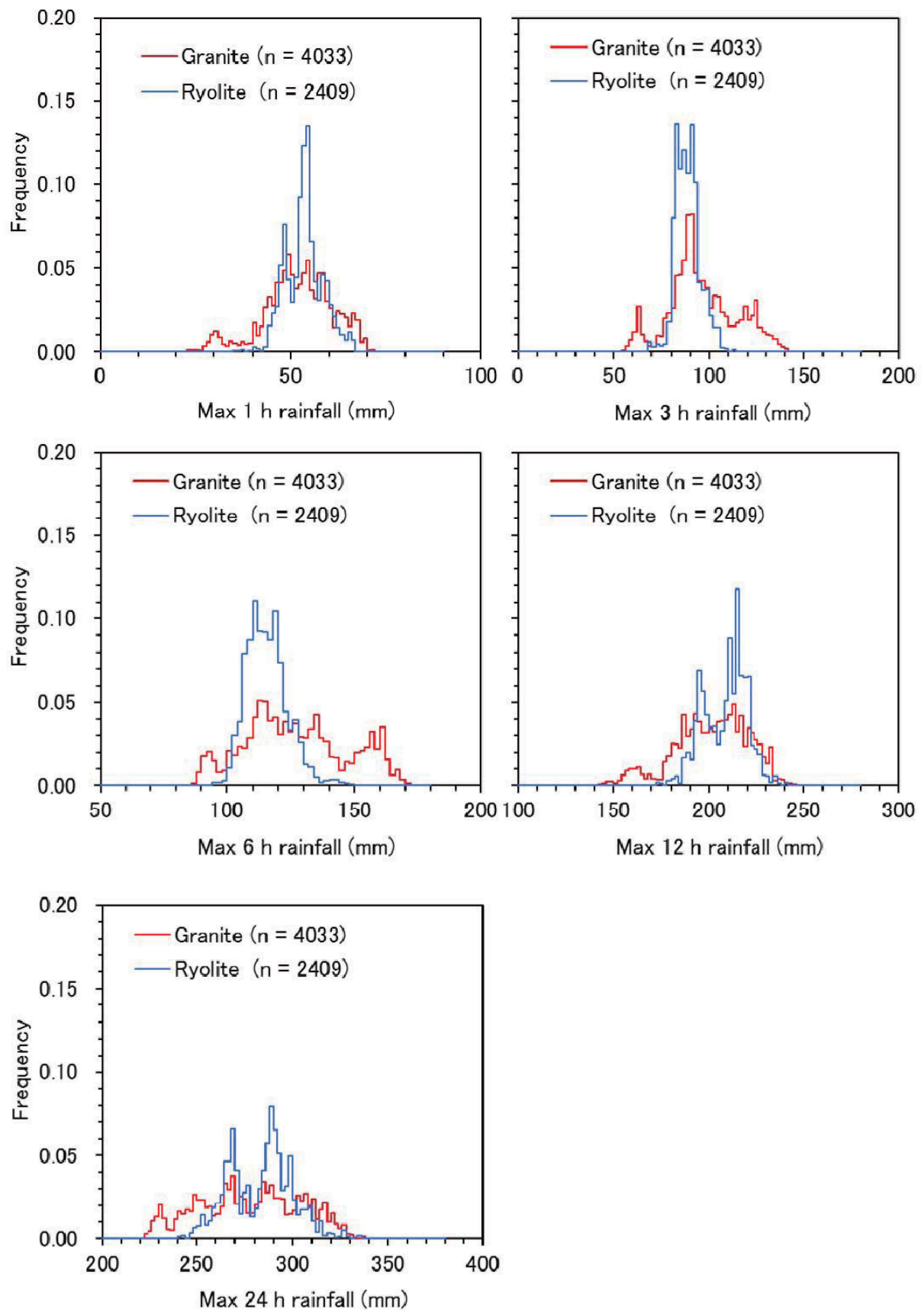


図 5. 花崗岩あるいは流紋岩を基盤とする斜面の崩壊源に供給された任意時間最大降水量の出現頻度分布.

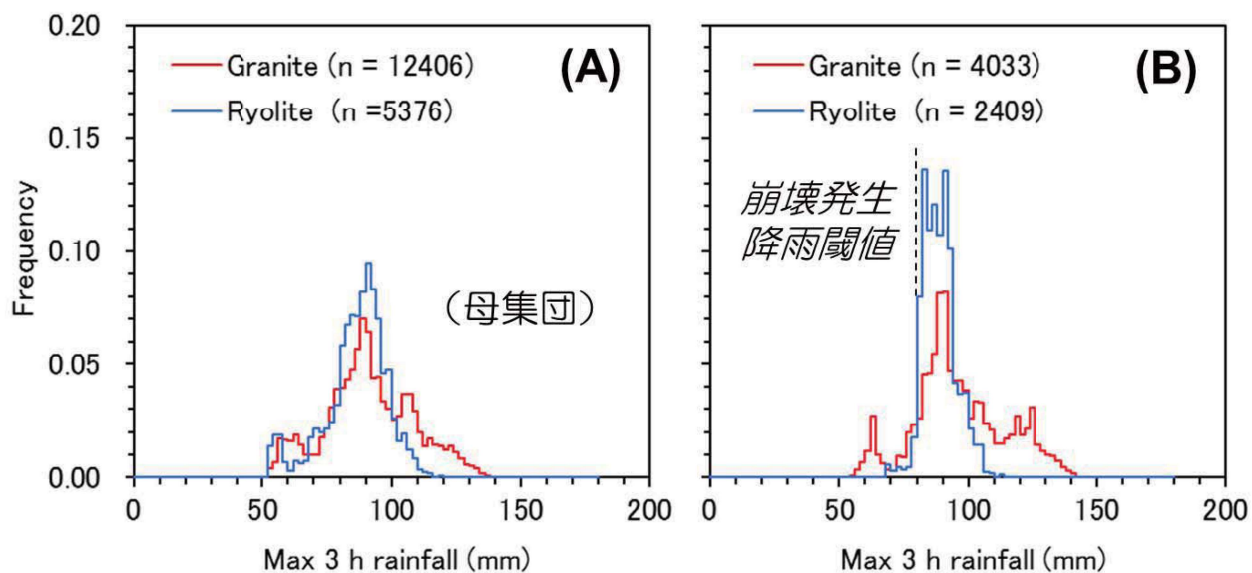


図 6. 花崗岩あるいは流紋岩を基盤とする山地全体 (A) あるいは、その中の崩壊源 (B) に供給された任意時間最大降水量の出現頻度分布.

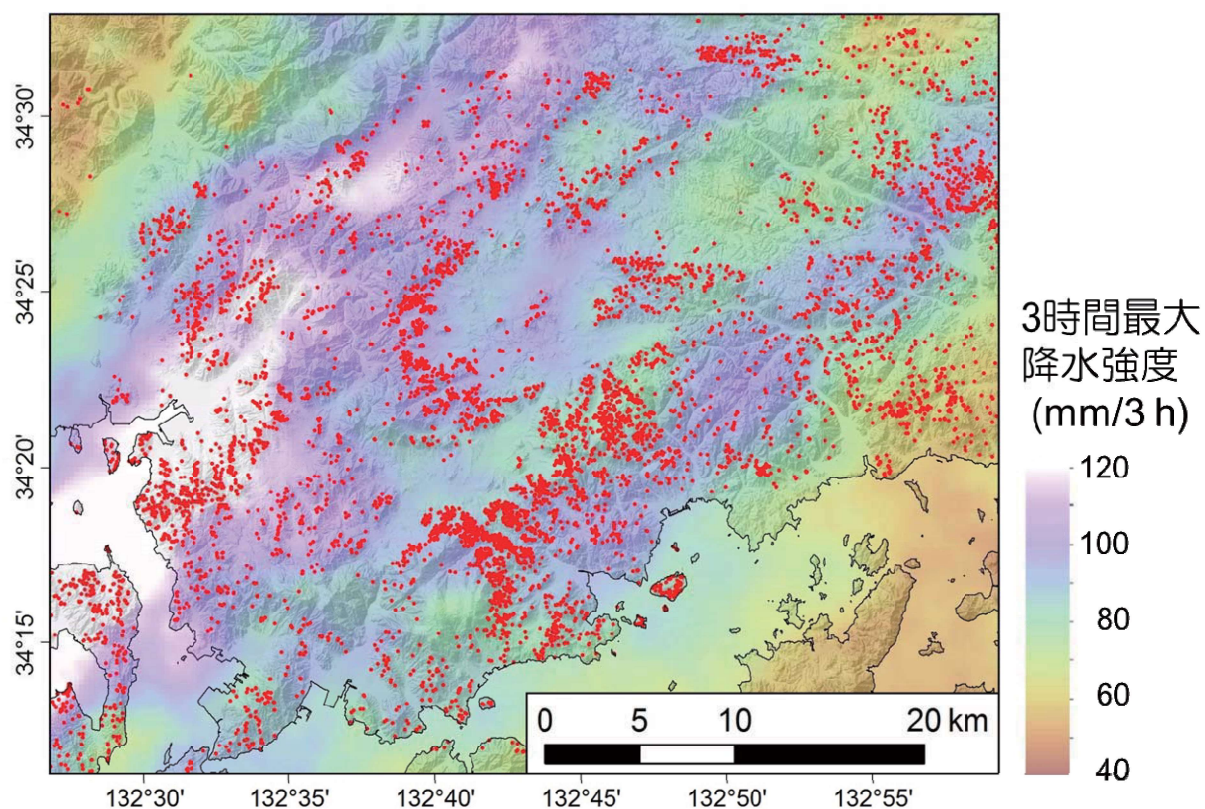


図 7. 広島沿岸部における 3 時間最大降水量 (背景色) と崩壊源 (赤点) の分布

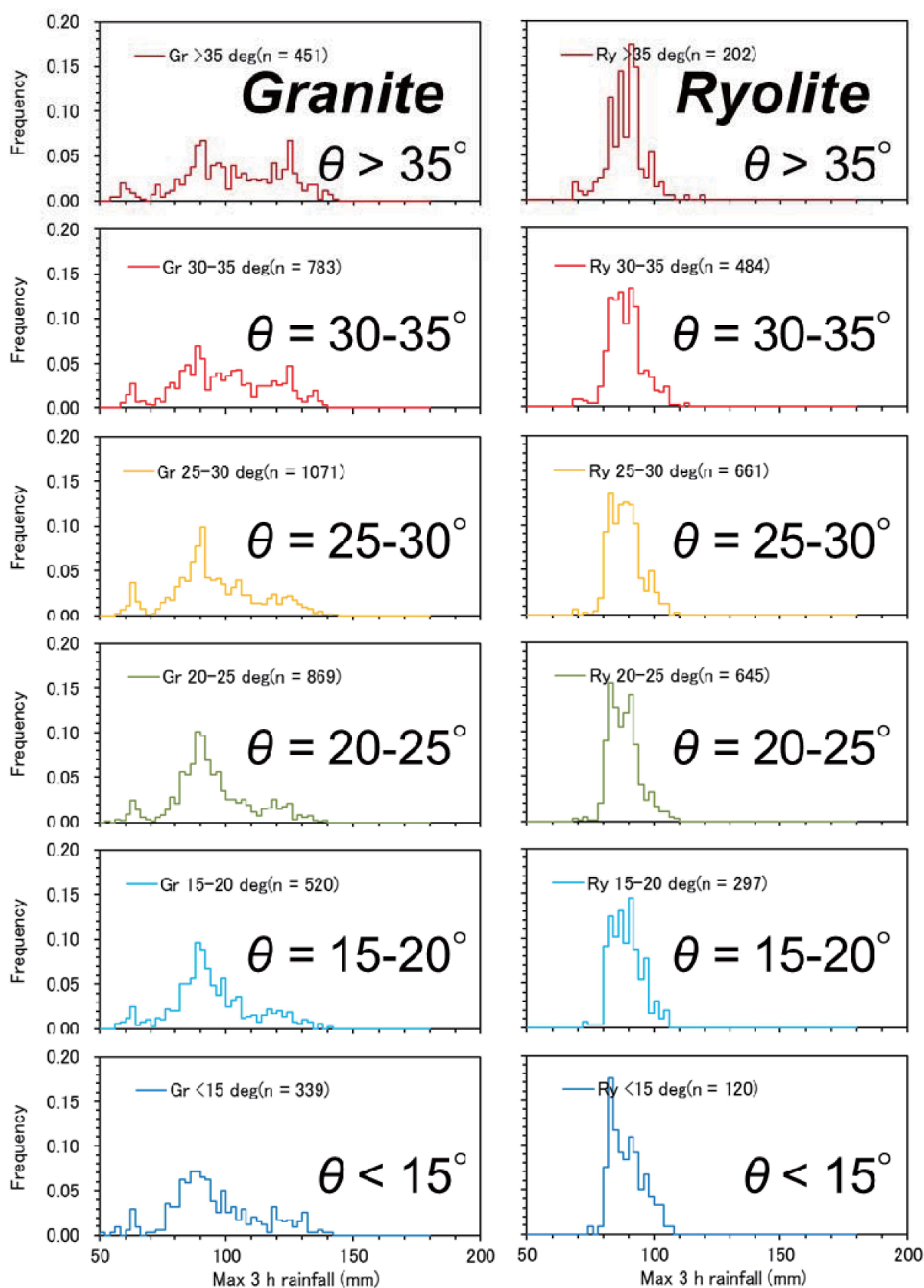


図 8. 花崗岩あるいは流紋岩を基盤とする斜面において、傾斜角の異なる崩壊源に供給された 3 時間最大降水量の出現頻度分布。

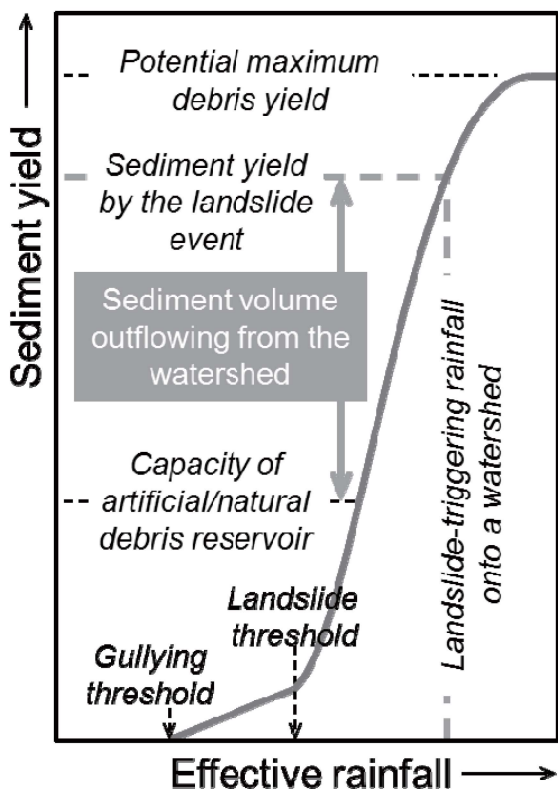


図 9. 流域における降水入力への応答としての土砂生産および土砂流出の概念図。

図 8 は崩壊源となった斜面の傾斜ごとに、そこにもたらされた雨の 3 時間最大降水量のヒストグラムを示したものである。これをみると、斜面勾配が小さくなるほど、土砂移動のための降雨閾値はより明瞭になる傾向は認められるものの、値それ自体が変化するようににはみえない。勾配が大きい場所ほど、より小さい強度の雨でも土砂移動を生じるように予想されるが現実には、そう単純な対応関係とはなっていないようである。これは、先に述べたように土砂移動の機構が多様であり、斜面勾配のみに依存して、崩壊が生じるわけではないことを反映したものと考えられる。流域内で生じる土砂移動に対する降雨閾値の精緻な推定には、崩壊源となる場の集水面積や崩壊予備物質の厚み、あるいは斜面構成物の水理性や可動性（静的・動的な強度特性）を考慮したモデリングが必要となるであろう。

以下に、降水と流域からの土砂流出の関係について、概念的にまとめる。図 9 に示すように、降雨の入力に対する応答としての土砂移動現象の発生と、流域からの土砂流出は、いくつかの閾値をもち、非線形的なふるまいをもつ。まず、地形変化に効果的な時間スケールにおける降水量（有効降雨）が十分に小さければ、土砂移動は

生じない。流域の集水機能が強く、可動性の高い土砂が溪床に存在する花崗岩溪流のような場合、有効降雨が小さくても、ガリー状の侵食が生じる可能性がある。ただし、この時の生産土砂量はそれほど大きくはならない。さらに有効降雨が増えて表層崩壊発生の閾値を超えると、流域内の斜面で土層の滑落が群発し、流動化した崩土が溪床堆積物を巻き込んで土石流化し、生産土砂量は急増する。今回の豪雨のような場合では、この土砂量は、流域内の自然な地形あるいは砂防ダム等の人工構造物による貯留容量を超え、流域外へと多量の土砂が流出することになる（図 9）。ただし、流域内の崩壊予備物質は有限であり、土砂生産の上限はこれに規定される。近い過去に、多くの土砂移動が生じた流域は免疫性を獲得し、降水量が増出して、土砂の生産量は抑制される。流域内での土砂生産の量を精緻に見積もるためには、斜面における崩壊予備物質の空間分布をモデル化し、どれほどの雨が降れば、どこでどれほどの量の物質が、不安定化するのかを定量的に見積もる必要がある。また、流域外への土砂流出に関して、その量と影響範囲を評価するためには、斜面や溪床で生産された土砂の移動過程についてのモデルとのカップリングも必要である。

今回の西日本豪雨災害により、局所的な強雨をもたらす線状降水帯が、短い期間に広域の複数個所で形成され、地質・地形の異なる場の条件において、多様な土砂災害が同時多発的に発生する懸念が現実のものとなった。人為的な気候変化が継続する近年の状況では、近い未来に同様の極端気象現象が再び生じる可能性は十分にある。今災害の経験を活かして、そのような事象に対応できるリアルタイムでの動的ハザードマッピングの方法を確立し、人的被害や社会的インフラ損失の軽減をはかることが急務である。

流域内での土砂移動現象は、その原因毎に発生に至る降雨閾値や、場所とタイミングおよび規模が異なる。それゆえ、警戒・避難のための指針も場の条件に依存して異なったものとなる。ハザード評価においては、土砂移動のタイプごとに発生機構が解明され、モデル化されていることが望ましい。これには、流域内で生じる地形および水文的な過程に対する深い理解が必要であり、今後も実証的な研究を継続的に、着実に進めていくことが重要である。

また、近年の災害で人的被害が拡大した要因として、地域住民が、適時に避難行動をとらなかったことが挙げられる。これは、地方行政やメディアを通じて発信される災害関連情報の精度が十分でないことと、その意味や重大性を、受け手側が把握できていないということによる。減災の実現には、ハザードおよびリスクの時空間変化をリアルタイムで精緻に計算し、地域社会に定量的な情報を提供して、どのような危機が自身に迫っているの

かを適時に、正確に、認識させることのできる仕組みが必要である。

豪雨による流域災害を予測し減災を実現するためには、まず地盤への降水浸透に伴い、山地流域内のどの斜面が、どのような広がりや厚みをもって不安定化しているのか、ハザードの時空間的な変化を定量的に評価することが重要である。また、崩壊源で滑動を開始した崩土がどこまで流下するのかについても、地形学的あるいは河川工学的に予測することが望ましい。これにより、背後に土砂の給源となる山地流域をもつ山麓居住地において、どこが、いつ、どれほど危険なのかを地図上に表示することができる。これは、極端気象災害に直面する地域社会の核心的な減災ニーズであり、分野横断的な研究

者組織による学際的体制と複合融合的な研究アプローチをもって、はじめて実践的な解決を見出すことができるだろう。現時点では、研究機関が地域社会に直接情報を提供することは、法治上の理由でできない。しかし防災の主流化が進み、地方行政体と学術研究機関との有機的連携が強化されると予想される近い将来において、こうしたリアルタイム災害モニタリングシステムはデファクトスタンダードとして社会に受け入れられ、地域個別の状況に合わせてブラッシュアップされてゆくだろう。近い未来のチャレンジにより、具体的なテストフィールドにおいて、そのプロトタイプが構築・提供されてゆくことが期待される。