

令和6年奥能登豪雨での土石流のメカニズム

京都大学 防災研究所 特定教授 竹林 洋史

1 はじめに

2024（令和6）年9月21日早朝に能登半島北西部の海上に線状降水帯が形成され、時間とともに線状降水帯は南下し、輪島市に短時間で多くの雨を降らせた。その結果、輪島市の多くの場所で洪水氾濫・土石流災害が発生し、甚大な被害が発生した。一方で、能登半島沖で2024（令和6）年1月1日にM7.6の地震が発生しており、9月に洪水氾濫・土石流災害が発生した溪流においても大きな揺れが発生した。

本報告では、2024年9月21日に輪島市の2カ所で発生した土石流の発生・流動特性について、2024年1月1日に発生した地震の影響に着目し、現地調査及び数値シミュレーションによって検討する。最後に、行方不明者捜索への洪水流・土石流の数値シミュレーションの利用の例を示す。

2 輪島市曾々木地区で発生した土石流

（1）災害現場の位置と被害の概況

輪島市曾々木地区は、輪島市市街地から海岸に沿って約17km北東に位置している（図1）。海岸沿いの国道249号線に沿って建物が存在している。

図1に示すように、土石流は2つの溪流から発生しており、西側の溪流の斜面勾配は約21度であり、東側の溪流（約27度）と比べ緩やかであるが、土砂災害警戒区域が設定されており、砂防ダムも設置されていた。一方、東側の溪流には土砂災害に対する対策は実施されていなかった。

土石流が発生した溪流の地質は、流紋岩で構成されており、写真1に示すように、多くの白い巨礫で構成されている。

被災した建物（写真2）は、東側と西側の溪流の合流点下流の県道沿いに位置していた。対象地点は土砂災害特別警戒区域には設定されていなかったが、多くの建物が破壊されている。これは、土砂災害警戒区域が設定されていなかった東側の溪流からも土石流が発生し、西側の溪流と同じ場所に流れ込み、流出土砂量が増えたことも原因の一つと考えられる。

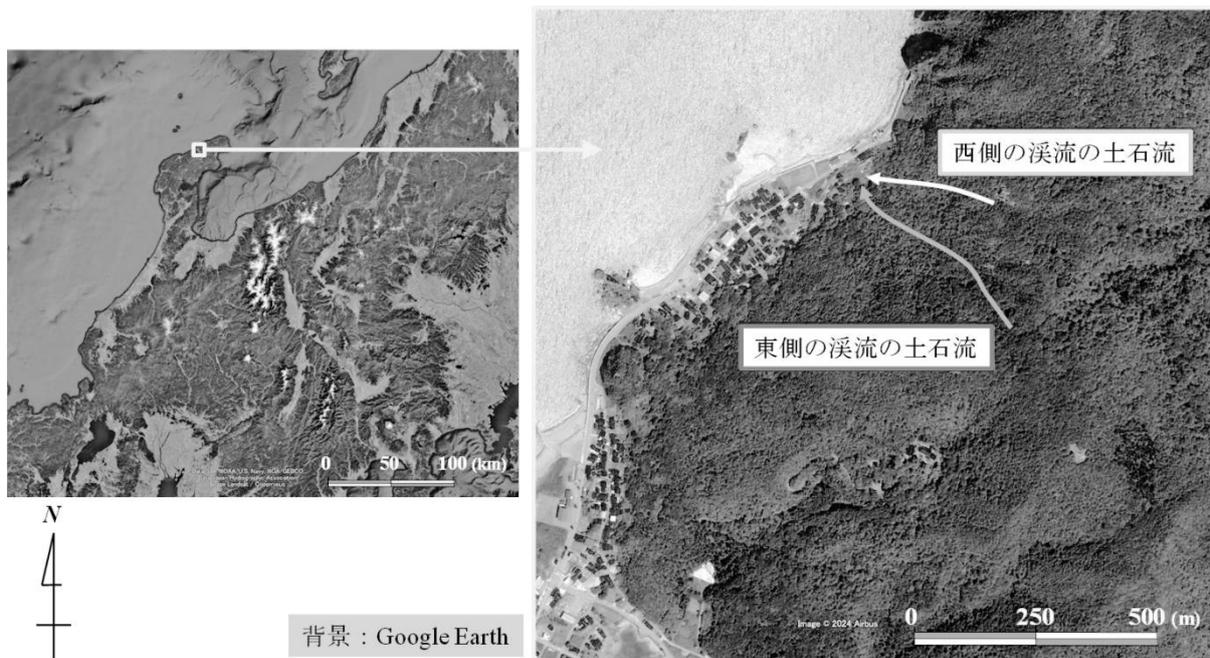


図1 土石流が発生した輪島市曾々木地区の位置



写真1 曾々木地区で発生した土石流によって流出した流紋岩



写真2 曾々木地区で発生した土石流によって破壊された建物

(2) 降雨条件

図2は、XRAIN（国土交通省が運用するリアルタイム雨量観測システム）によって得られた輪島市曾々木で土石流が発生した流域の中央付近における2024（令和6）年9月20日21時～21日18時の降雨強度の時間変化を示している。

21日午前5時ごろに短時間であるが、時間換算で150mmを超える高強度の雨が降っており、豪雨中の最大降雨強度を記録している。この雨により道路の冠水などが発生し、一部の住民は避難行動を開始していたが、この時点では土石流は発生していない。

その後、午前8時ぐらいから降雨強度が再度大きくなり、8時50分ごろに1回目の土

石流が発生している。この時点までの降り始めからの積算降水量は149mmである。この値は、斜面崩壊起源の土石流の発生までの積算降水量としては、非常に小さい値である。積算降水量のみでは斜面崩壊の発生・非発生を厳密には判断できないが、積算降水量は一つの重要なパラメータである。

なお、1回目の土石流は、家屋が被災した住民が避難した直後に発生しており、住民は土石流の発生を確認していた。

2020年7月の熊本豪雨の時に津奈木町福浜で観測された降雨強度の時間変化では、土石流発生までの積算降雨量は293mmであった。また、図6は2019年の台風19号による豪雨の時に宮城県丸森町子安で観測された降雨強度の時間変化では、土石流発生までの積算降雨量は309mmであった。（※丸森町子安は花崗岩地帯に位置しており、斜面崩壊に起因した土石流が発生しやすい地質である。）

このように、斜面崩壊起源の土石流の多くは、積算降水量250mm以上で発生している。2013年以降、多くの土石流の発生までの積算降水量を調べているが、斜面崩壊起源の土石流が積算降水量250mm以下で発生したのは、広島花崗岩地帯ぐらいである。

図3に五十嵐ら（2016）によって開発されたリアルタイム土砂災害リスク表示システム¹⁾により得られた2024年9月21日午前8時50分の土砂災害リスクの空間分布を示す。土石流発生時の対象地点の土砂災害発生危険度は、ランク4となっており、対象地点は土石流の発生リスクが高かったことがわかる。

（3）地震の影響に関する検討

図4は、2024年1月1日の地震前後の地盤変動量を示している。図中の実線の矢印は、土石流の主流が流れた場所である。どちらの土石流にも地震後に地盤が高くなった領域（楕円で囲まれた部分）がある。

一方、地盤が高くなった領域の上流には地盤が低下した領域がある。つまり、2024年9月に土石流が発生した曾々木地区の流域では、1月の地震時に斜面崩壊が発生し、崩土がブロック矢印のように溪流に流れ込み、堆積していたことが分かる。

豪雨時であれば、崩土は水と混合して土石流化し、下流に流れていたと考えられるが、地震発生時は土石流が発生するほどの水が溪流に存在せず、崩土は溪流の途中に堆積したものと考えられる。

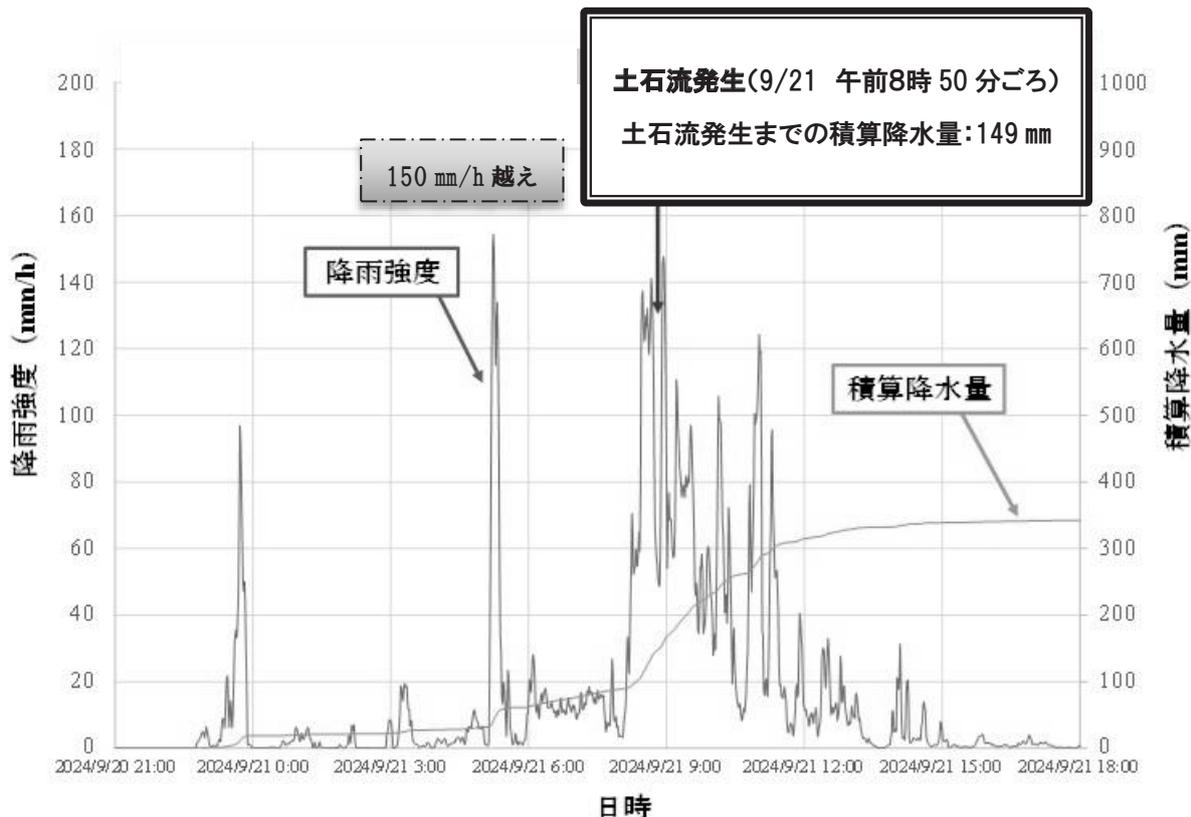


図2 輪島市曾々木で土石流が発生した流域の中央付近におけるXRAINによる降雨強度の時間変化

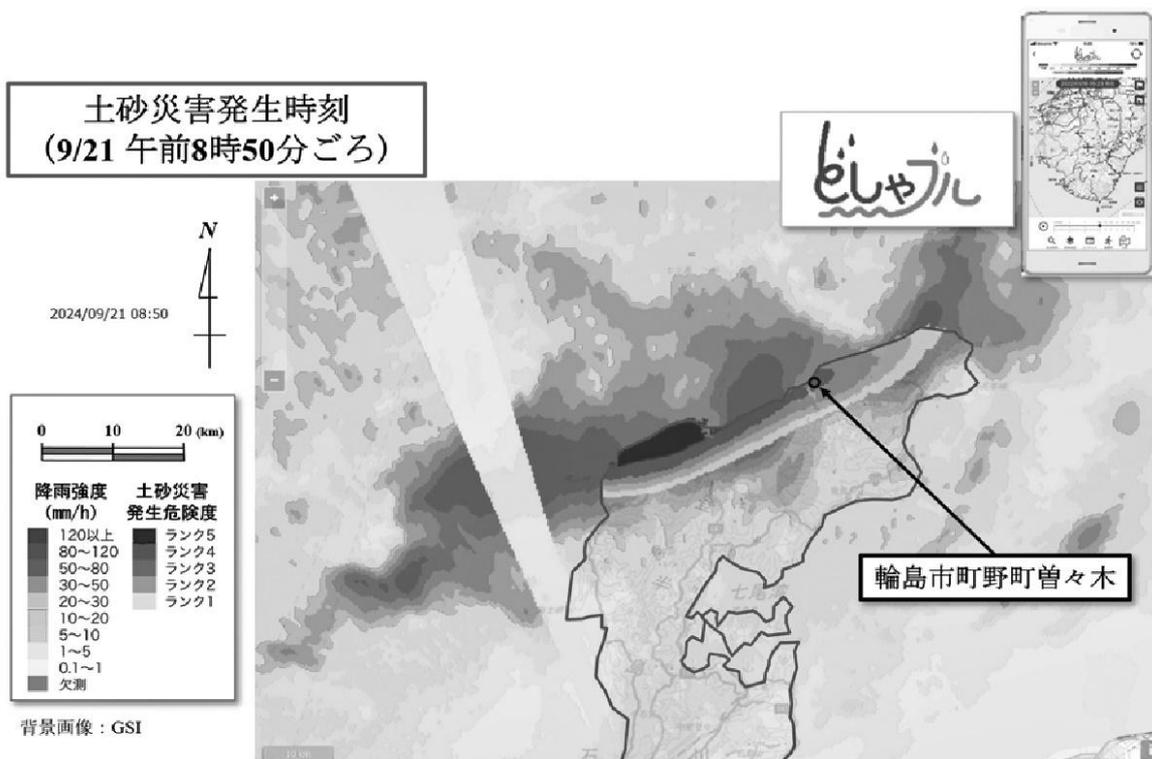


図3 リアルタイム土砂災害リスク表示システム¹⁾による土砂災害リスクの空間分布

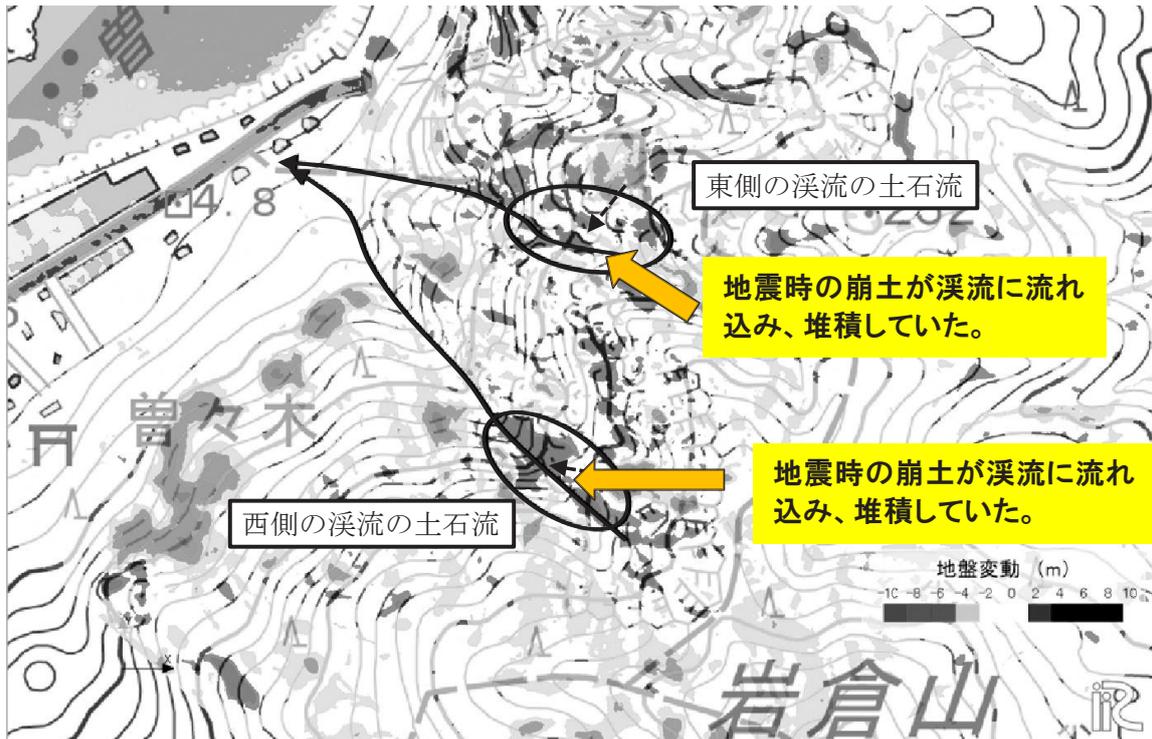


図4 地震前後の地盤変動量（地盤隆起分修正済み）

（背景：国土地理院）

図5は、地震後に撮影された曾々木地区の斜面の様子である。東側の溪流における土砂の堆積の状況は確認が困難であるが、どちらの溪流でも斜面崩壊が発生しており、西側の溪流では溪流の途中で土砂が堆積している様子がわかる。

地震後に住民は崩土が斜面の途中で止まっていることを確認しており、行政にも相談していたが、9月21日の時点では対応できていなかったようである。

以上より、土石流の発生までの積算降水量が少ないのは、土石流の起点となった土砂の移動が斜面崩壊起源ではなく、溪流内に堆積していた土砂の移動によるものであったためと考えられる。

なお、対象流域では、最終的に積算降水量が約340mmとなっており、地震の影響が無くとも土石流が発生した可能性が高い。つまり、対象地点における地震の影響は、土石流の発生・非発生というよりも、土石流の発生時刻を早めることに影響を与えていたと考えられる。

地震時に発生した斜面崩壊による崩土が溪流の途中で堆積しているかどうかは、図4のように、地震前後の地盤標高データの差分を見れば容易に判断できる。つまり、地震後の豪雨時に土石流が発生しやすくなっている溪流の一部については、事前に容易に抽出できる。そのため、地震発生後、速やかに地盤標高データを取得し、土石流リスクが高くなっている溪流を住民に示すことによって、地震・豪雨による複合的な土砂災害による被害を軽減できることが期待できる。



図5 2024年1月1日の地震後に撮影された曾々木地区の斜面の様子
(写真：国際航業・パスコ)

(4) 土石流の数値シミュレーション

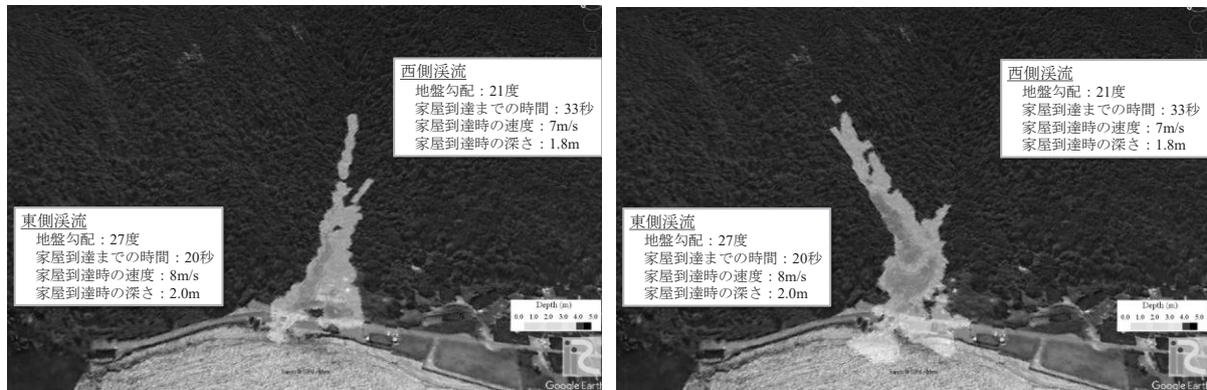
Takebayashi ら²⁾の方法を用いて2つの溪流で発生した土石流の数値シミュレーションを実施した。被災後の氾濫域の土砂の堆積状況を見ると、西側の溪流からの土石流の堆積物の上を東側の溪流からの土石流が流れたようである。そのため、本シミュレーションでは、西側の土石流を先に発生させ、50秒後に東側の土石流を発生させた。土石流の発生間隔は最初の土石流（西側溪流）に次の土石流（東側溪流）が大きく重ならない程度の間隔としており、実際の発生時間間隔とは無関係である。

斜面崩壊の発生地点は、2024年1月1日の地震時の崩土が堆積した地点の直下である。図6に土石流の流動深の空間分布を示す。最初の土石流は斜面崩壊発生から33秒で宅地に到達した。土石流到達までの時間が短いため、土石流センサーなどで土石流の発生を確認できたとしても土石流発生後の避難所への避難は非常に困難である。

最初の土石流の宅地到達時点の流動深は約1.8m、流速は秒速約7m（時速約25km）であり、比較的築年数の古い木造家屋は破壊される可能性のある流体力となっていた。二回目の土石流（東側の溪流）は、宅地到達時点の深さは約2m、流速は秒速約8m（時速約29km）であり、西側の溪流の土石流よりも規模が大きい。これは、東側の溪流の勾配が、西側の溪流の勾配よりも急であることが一つの原因と考えられる。

現在の土砂災害特別警戒区域の設定では、1回の土石流のみを対象としており、今回のような複数回の土石流は考慮されていない。しかし、例えば2021年7月に熱海で発生した泥流は、少なくとも8回発生しており、非常に広い範囲で建物が破壊された。また、前述の宮城県丸森町子安で発生した土石流も少なくとも3回発生しており、一雨中に複数回の土石流が宅地に流れ込む現象は頻繁に発生している。複数回の土石流の発生に

よって、建物が被災する範囲が広がることを考えると、土砂災害特別警戒区域の設定方法について、再考が必要と思われる。



(a) 40 秒後

(b) 70 秒後

図6 輪島市曾々木で発生した土石流の数値シミュレーション
(流動深の時間変化、背景画像：Google Earth)

3 行方不明者捜索への洪水流・土石流の数値シミュレーションの利用

図7にこれまで国内で発生した水難者数等の経年的な推移を示す。図に示されている数字は、河川流域に限定されたものではないが、参考のためここで示す。

水難者数は年々減少していたが、2003（平成15）年以降は横ばいである。一方、2003（平成15）年以降の無事救出者数についてもほぼ横ばいである。この理由については様々な要因があると思われ、筆者はその主要因は把握していない。しかし、水難者数に対する無事救出者数の割合をなんとか増やしたいという気持ちは読者も筆者も一緒だと思っている。

筆者は、洪水流・土石流の数値シミュレーションを利用すれば、水難者数に対する無事救出者数の割合を増やすことができるのではと考えている。その一例を示す。図8に2013年に伊豆大島で発生した泥流の数値シミュレーションの結果を示す。図中には、斜面途中に存在する家屋から泥流と同じ速度で移動する黒い粒子を発生させている。もし、黒い粒子を発生させた家屋の住民が泥流によって流された場合、非常に高い確率で粒子が流れた範囲に住民は流されていると予測できる。そのため、住民が流されたことが分かった時点で図8に示すような数値シミュレーションを実施することにより、捜索範囲を絞ることが可能となり、行方不明者を早期に発見できる確率が上がると思っている。

数値シミュレーションによって結果を出力するまでの時間は流域の大きさに大きく依存するが、小さい流域であれば1時間程度で図8のような結果の出力が可能である。これによって、72時間以内に行方不明者を発見できる確率も上がるのではと考えている。本稿が土石流に関する内容であったため、土石流（泥流）に関する例を示したが、洪水流についても利用可能と考えている。

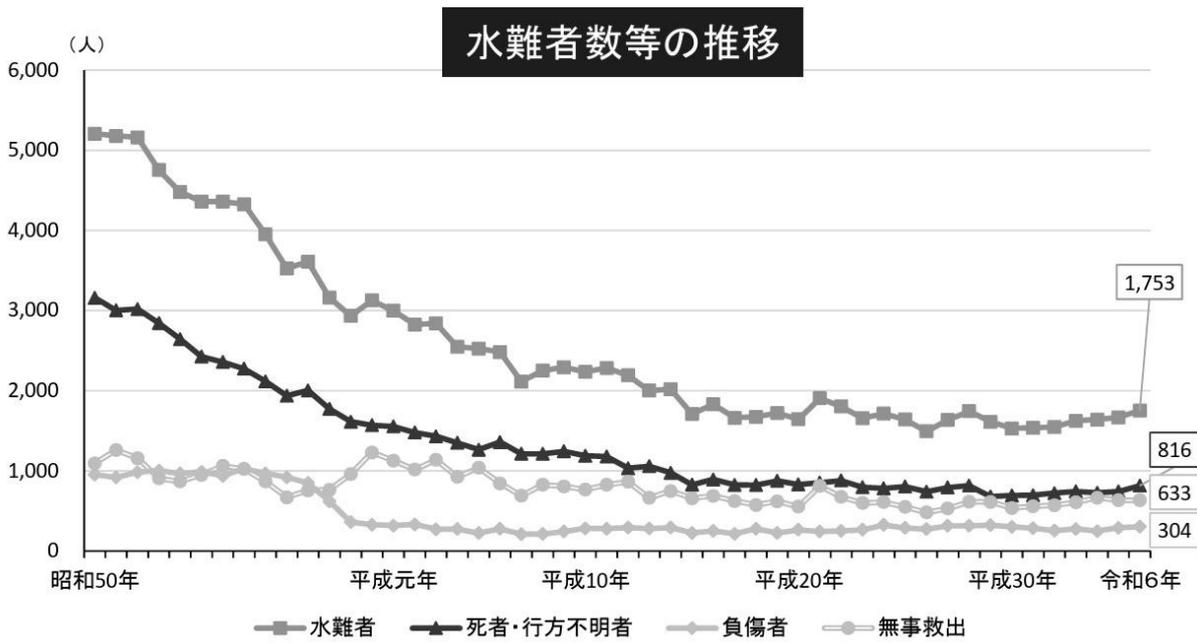


図7 水難者数等の推移⁴⁾ (出典：令和6年における水難の概況等 警察庁生活安全局生活安全企画課：令和6年における水難の概況等 3. 2025)

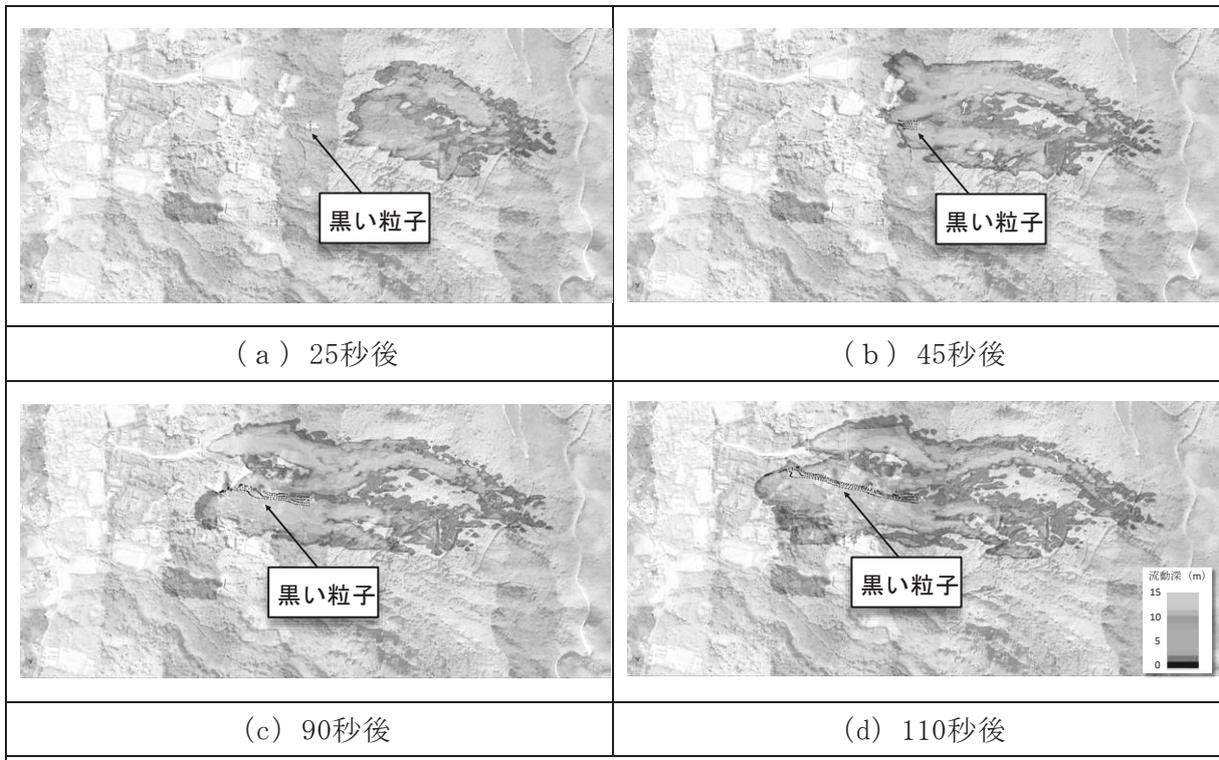


図8 2013年に伊豆大島で発生した泥流の数値シミュレーション (流動深の時空間的な変化 背景：国土地理院)

5 おわりに

2024年9月21日に輪島市曾々木地区で発生した土石流の発生・流動特性について、2024年1月1日に発生した地震の影響に着目し、現地調査及び数値シミュレーションによって検討した。

本報告で対象とした土石流現象は、2024年1月1日の地震による影響を受けていた。地震時に既に斜面崩壊が発生している場合は、地震後に豪雨災害の発生リスクが上昇していることの予測は可能である。また、現在の水害・土砂災害対策の問題点をいくつか指摘し、改善方法を提案した。最後に、行方不明者捜索への洪水流・土石流の数値シミュレーションの利用の一例を示し、行方不明者を早期に発見できる可能性を示した。

【謝辞】

本研究は、パシフィックコンサルタンツ株式会社のサポートにより実施されました。ここに記して感謝致します。

【参考資料】

1. 五十嵐孝浩, 竹林洋史, 浜田裕貴, 的場萌実, 飛岡啓之, 澤田悦史, 平川了治: “生命の危険からの自発的回避”のための土砂災害危険情報サービスの構築, 土木学会論文集 B1 (水工学), 72(4), I_1285-I_1290, 2016.
2. Hiroshi Takebayashi, Masaharu Fujita, Koichiro Ohgu-shi: Numerical modeling of debris flows using basic equations in generalized curvilinear coordinate system and its application to debris flows in Kinryu River Basin in Saga City, Japan, Journal of Hydrology, 615, Part A, 128636, 2022.
3. Jonathan M. Nelson, Yasuyuki Shimizu, Takaaki Abe, Kazutake Asahi, Mineyuki Gamou, Takuya Inoue, Toshiki Iwasaki, Takaharu Kakinuma, Satomi Kawamu-ra, Ichiro Kimura, Tomoko Kyuka, Richard R. McDon-ald, Mohamed Nabi, Makoto Nakatsugawa, Francisco R. Simoes, Hiroshi Takebayashi, Yasunori Watanabe: The international river interface cooperative: Public domain flow and morphodynamics software for education and applications, Advances in Water Resources, 93, 62-74, 2016.
4. 警察庁生活安全局生活安全企画課: 令和6年における水難の概況等, 3, 2025.