

## 2024年能登半島地震による斜面変動と連鎖複合災害 —予察と展望—

### Coseismic Landslides in the 2024 Noto Peninsula Earthquake and the Cascading Disaster

松四雄騎<sup>(1)</sup>

Yuki MATSUSHI<sup>(1)</sup>

(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

(1) Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Japan

#### Synopsis

This report presents preliminary results of multifaceted analyses for the geomorphological and engineering geological aspects of coseismic landslides caused by the 2024 Noto Peninsula earthquake and the subsequent cascading disaster. Inventory mapping of the landslides revealed an exponential decrease in the landslide density with distance from the northern coastal line near to the seismogenic fault system, indicating the acute influence of the declining seismic shaking. The landslides clustered in the areas underlain by pyroclastic rocks and siliceous siltstone. Localized landslide distribution within those lithological conditions seemed to be regulated most probably by relief, gradient, and curvature of the hillslopes, reflecting potential topographic amplification of the seismic shaking. Landslide susceptibility in a local scale seems to be linked with characteristic weathering processes of the bedrocks and the resultant structure, thickness, and physicochemical properties of the near-surface weathering zone. The vast volume of debris emplaced in the steep mountainous terrain posed severe hazard to the residential areas in the range front lowlands via the subsequent fluvial discharge, which had become a reality in the heavy rainfall event in September 2024. Relative hazard level for the sediment reworking from hillslopes and channels could be evaluated and visualized to offer a possible risk communication tool for disaster mitigation.

**キーワード:** 斜面変動面積率, 地形条件, 風化帯構造, 土砂の再移動, ハザードマッピング

**Keywords:** landslide area ratio, topographic conditions, weathering zone structure, debris reworking, hazard mapping

#### 1. はじめに

地震時に発生する斜面変動は、山麓居住地や山間地集落に重大な災害リスクをもたらしている。その発生様態は、地形条件や地盤構造に依存して多様で、場所と規模の予測や発生閾値の推定が困難であり、

発災のシナリオ想定は容易ではない。また、突発的な事象であるがゆえ避難のためのリードタイムは極めて短く、また強震の最中に生じるため避難行動を速やかにとることも困難である。そのため、地震時斜面変動による土砂災害の防減災には、斜面の比高や勾配といった地形条件、地質的不連続面の姿勢と

性状あるいは風化帯の累重といった地盤構造を手掛かりとした事前のハザード評価が最重要である。

2024年1月1日に発生した能登半島地震では、半島北部の広域で $10 \text{ m s}^{-2}$  (1000 Gal) を超える表面最大加速度がもたらされ、地形・地質条件および風化帯構造や先行降雨も含めた地盤条件も相まって多数の落石、岩盤崩落、地すべり、表層崩壊、土石流が発生した。本稿では、これらの多様な斜面変動について、その発生実態を概観し、発生場の地形・地質条件との関連性や、一次的・二次的ハザードマッピングに向けた研究の方向性と今後の課題を述べる。なお、本稿では、マスマーブメントのうち、災害につながるような斜面での土砂移動現象を総称して、「斜面変動」の語を用いることとし、形態や土塊の運動様式に基づく区別をした記述をする必要があるときに、上述のようにマスマーブメントのタイプを特定した用語を用いることにする。

## 2. 能登半島北部の地形・地質状況と地震による斜面変動の実態

### 2.1 地形的素因

能登半島北部は、主として第三系の火成岩および堆積岩類を基盤とし、北方ほど高起伏でよく開析された標高100–500 m の丘陵地形を呈する (Fig. 1A)。北岸沖には2024年能登半島地震を引き起こした断層系が西南西–東北東走向で延び (井上ほか, 2010)、本地震では北縁に向かうほど大きな変位量を呈する

顕著な隆起が生じた (Fig. 1B; Fukushima et al., 2024)。

こうした地殻変動は、能登半島北部の北北西–南南東方向の地形断面 (Fig. 1C) の特徴と調和的である。すなわち、南方では多段の海成段丘が広く発達する (太田・平川, 1979) のに対し、北方では急峻な山容を呈する原面の失われた丘陵が拡がり、それらの接峰面の形状は今回同様のパターンでの隆起の累積により説明できる (Fig. 1)。北縁部では隆起速度が大きく、波浪営力も海岸を侵食するに十分大きいために、水平方向に広い波食面が形成・保存されず、段丘の発達に乏しい地形となった可能性がある。内陸部の隆起量の大きな場では、河川の下刻とマスマーブメントによって、斜面は大きな起伏と勾配を獲得するに至ったと考えられる。こうした $10^5$ – $10^6$  年にわたる内的営力と外的営力の長期作用により、今回の斜面変動に対する地形的素因が成立したものと捉えることができよう。

### 2.2 斜面変動の空間分布

2024年能登半島地震で生じた斜面変動は数千か所に及んだ (Fig. 2A)。ここで用いたデータセットは、国土地理院によってマッピングされたもの (国土地理院, 2024) をベースに、追加的な空中写真判読によって筆者が加筆修正したインベントリである。崩土の供給源と堆積域を区別してマッピングすることは難しく、現在もデータ解析途上のため、ここでは斜面変動の個別面積や発生数の詳細統計には立ち入らない。

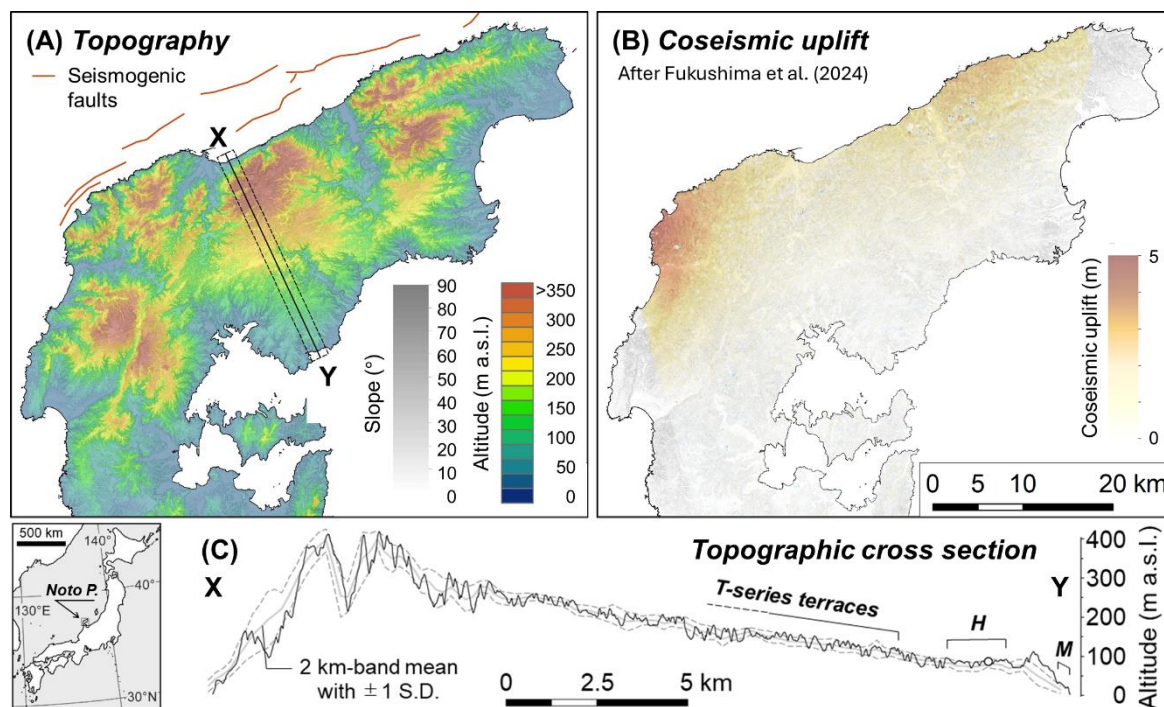


Fig. 1 Topography and coseismic uplift by the 2024 earthquake in the northern Noto Peninsula.

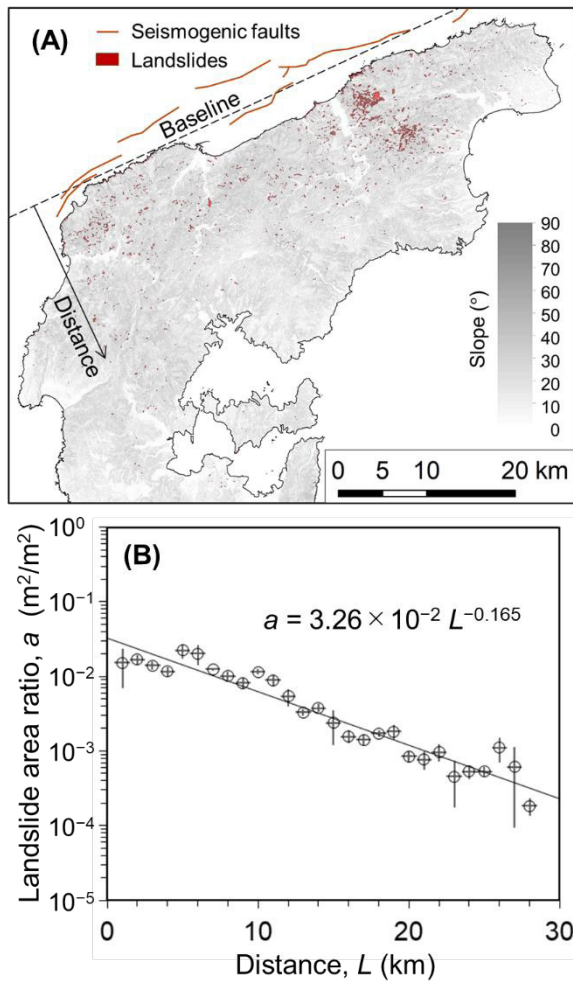


Fig. 2 Coseismic landslide distribution by the 2024 Noto Peninsula earthquake.

数十か所で河道の閉塞が発生し、可能最大湛水量が $10^4 \text{ m}^3$ スケールの堰止湖が出現した。中には越流によって堤体土砂の部分流出が生じたものもあったが、大多数は湛水に伴って埋塞部の通水流量と上流からの流入流量がバランスし、数日以内に水位が一時的定常を保つ状態となった。これらの多くは、のちに自然あるいは人為的に排水されたり、2024年9月の豪雨によって埋積あるいは破堤したりした。

半島北縁に断層系と平行な $\text{N}65^\circ\text{E}$ の基線を設定し、それに直交する $\text{S}25^\circ\text{E}$ 方向に距離を定義して、斜面変動の面積率を解析した。幅200 mの帯を解析解像度とし、5点移動平均値の平均と標準偏差を1 kmおきに算出したところ、斜面変動面積率は基線からの距離に対して指数関数的に低減することがわかった (Fig. 2B)。この全体的な傾向は、誘因である地震動の距離減衰を反映しており、値の揺らぎは素因である地形・地質条件の影響を受けているものと解される。

### 2.3 斜面変動に対する地形・地質の影響

斜面変動の空間分布は、山塊の高所にクラスタリングしており (Fig. 2A)、地形と地質の影響がうかがわれる。Fig. 3に典型的な場での斜面変動と地質との対応関係を示す。この領域では火山岩類が高所を、堆積岩類が低所を構成する傾向にあり、斜面変動は特に火砕岩を基盤とする山塊の高標高域および珪質泥岩からなる斜面の河川沿い急傾斜部に集中している (Fig. 3)。基線からの距離に対する全体データへの回帰関数 (Fig. 2B) を用いて正規化したアノマリ

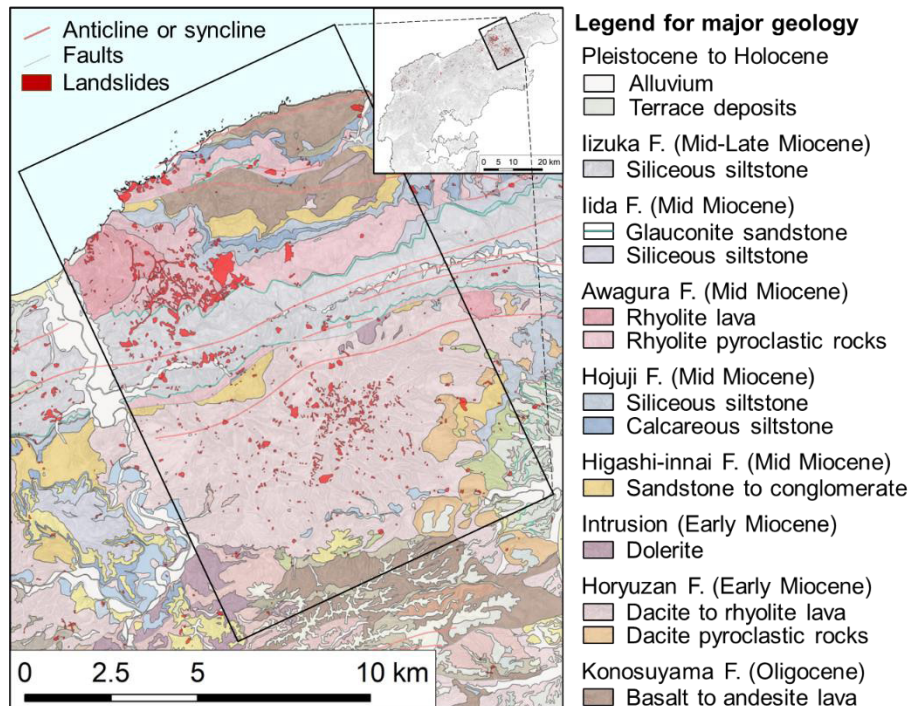


Fig. 3 Geological map with coseismic landslide distribution in the Machino area, northern Noto Peninsula.



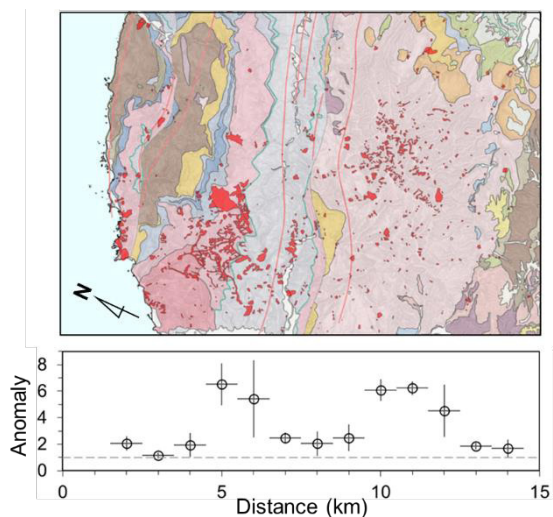


Fig. 4 Coseismic landslide distribution by the 2024 Noto Peninsula earthquake.

一 (Fig. 4) をみると、これらの火砕岩および珪質泥岩を基盤とするクラスター領域では、相対的に5–7倍斜面変動が発生しやすかったことがわかる。

地質ごとに地形が斜面変動にもたらした効果を、定量的に解析してみよう。ここでは、国土地理院が発行している基盤地図情報のうち10 m解像度のデジタル標高モデルを用いた。まず、起伏量を直径500 mの円内での標高値の標準偏差として定義し (Fig. 5)、この起伏指数 (5 mビン) ごとの解析領域の全体面積を母数に取った地形出現面積頻度と斜面変動面積頻度、および両者の比 (すなわち当該ビンに相当する

起伏指数での崩壊面積率) をプロットした (Fig. 5)。これをみると、特に火砕岩と珪質泥岩において大起伏であるほど、顕著に斜面変動も発生しやすくなることがわかる (Figs. 5A, B)。また、溶岩から成る斜面では、斜面変動面積率が增大する閾値がより明瞭で、かつ、高起伏側に寄っていることも読み取れる (Fig. 5C)。砂岩や礫岩を基盤とする場合は起伏が小さく、斜面変動の発生も少ないため、明瞭な傾向は認められなかった (Fig. 5D)。

火砕岩と珪質泥岩について、斜面の勾配と凹凸形状の効果も確認した (Fig. 6)。両者はいずれも斜面傾斜角が35°を超えると、斜面変動面積率が增大することがわかった (Figs. 6A, B)。また、地形曲率については、いずれの地質でも谷型凹形斜面で斜面変動面積率が増大し、また火砕岩では尾根型凸形斜面でも斜面変動面積率が大きかった。

これらの傾向は、今回のイベントでの先行降水の影響を反映したものと思われる。2023年12月の降水量は平年の1.5倍以上にあたる460 mmに達し、地震発生の10日前に60 cmあった積雪が前日までに融解している。地中に浸透した降水は地盤の動的せん断強度を低下させるとともに、崩土の流動性を上昇させ、風化帯の発達した斜面での崩壊群発と谷部を流下する土石流の発生要因になったものと推測される。

## 2.4 地形場および地質ごとの斜面変動様態

2024年能登半島地震で生じた斜面変動の様態は、

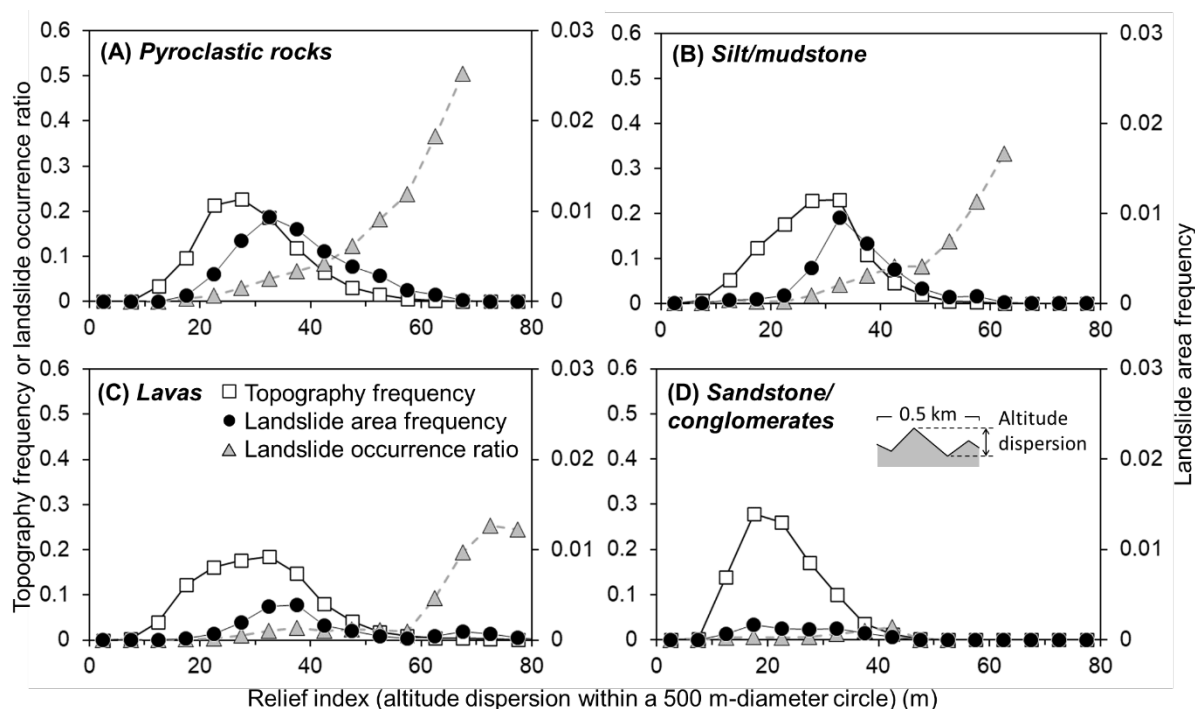


Fig. 5 Topographic (relief) and lithological controls on the occurrence of coseismic landslides in the Machino area, northern Noto Peninsula.

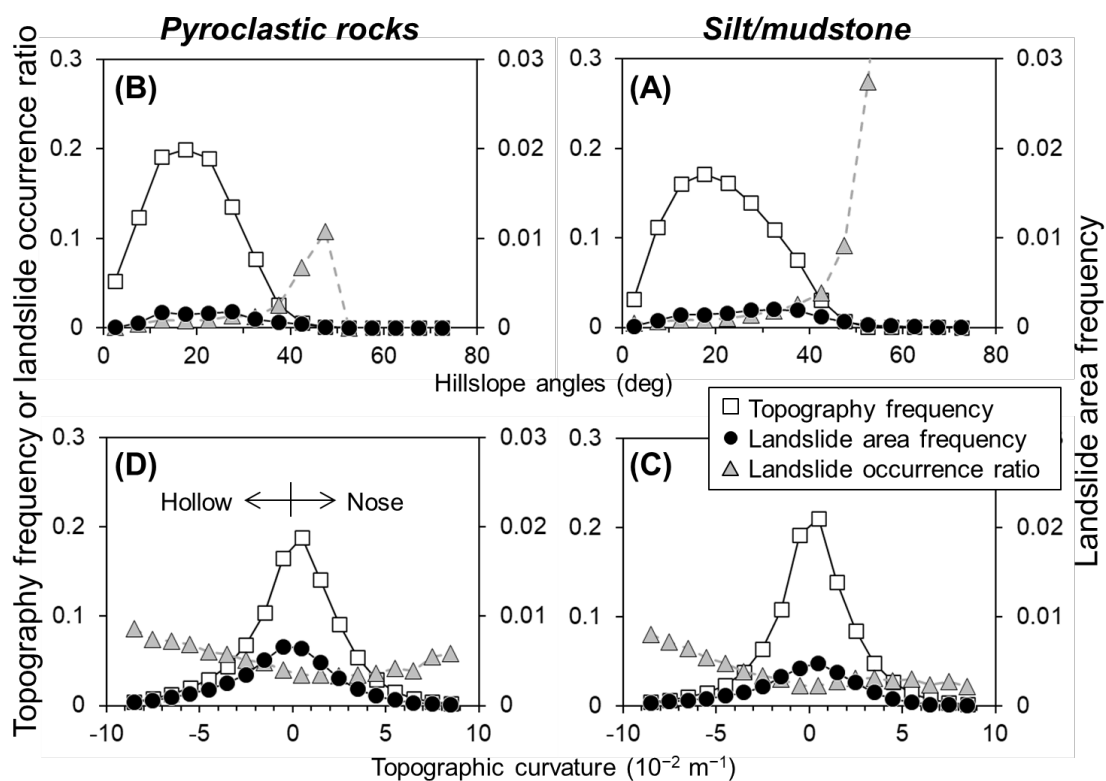


Fig. 6 Topographic (slope and curvature) effects for the coseismic landslides in mudstone and pyroclastic rock hillslopes in the Machino area, northern Noto Peninsula.

地形場および基盤地質の条件に依存して多様である。例えば、海食崖では岩盤内の地質不連続面の産状を反映したものと思われる楔形の崩落が多発する様相がみられたり、硬岩分布域ではすべり面に沿ったせん断破壊を伴う崩壊よりもむしろ岩塊が個別に運動する落石が多発する傾向にあったりするように見受けられた。ここでは特に、内陸山間地の火砕岩と珪質泥岩の分布域で多く生じた典型的な様態の斜面変

動をとりあげ、その要因を考察する。

火砕岩の分布域では、山頂付近から崩れる表層崩壊が群発した (Fig. 7A)。斜面基部では極めて急峻な谷壁が形成されている一方で、傾斜変換線を挟んでやや勾配を減じてはいるものの急傾斜な上方の斜面で風化帯の最表層部が薄く剥離するように滑動しているのが特徴的である (Fig. 7B)。また火砕岩と珪質泥岩の共存する斜面では、大規模な再活動型地

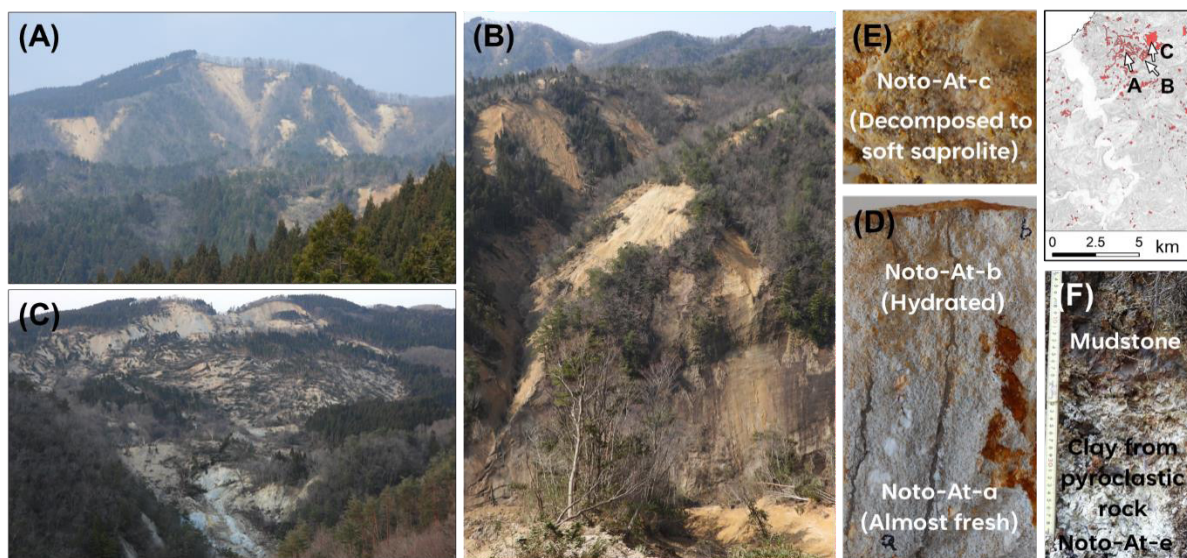


Fig. 7 Landslide types and bedrock weathering features in pyroclastic rock (Awagura Formation cf. Fig. 3) area.



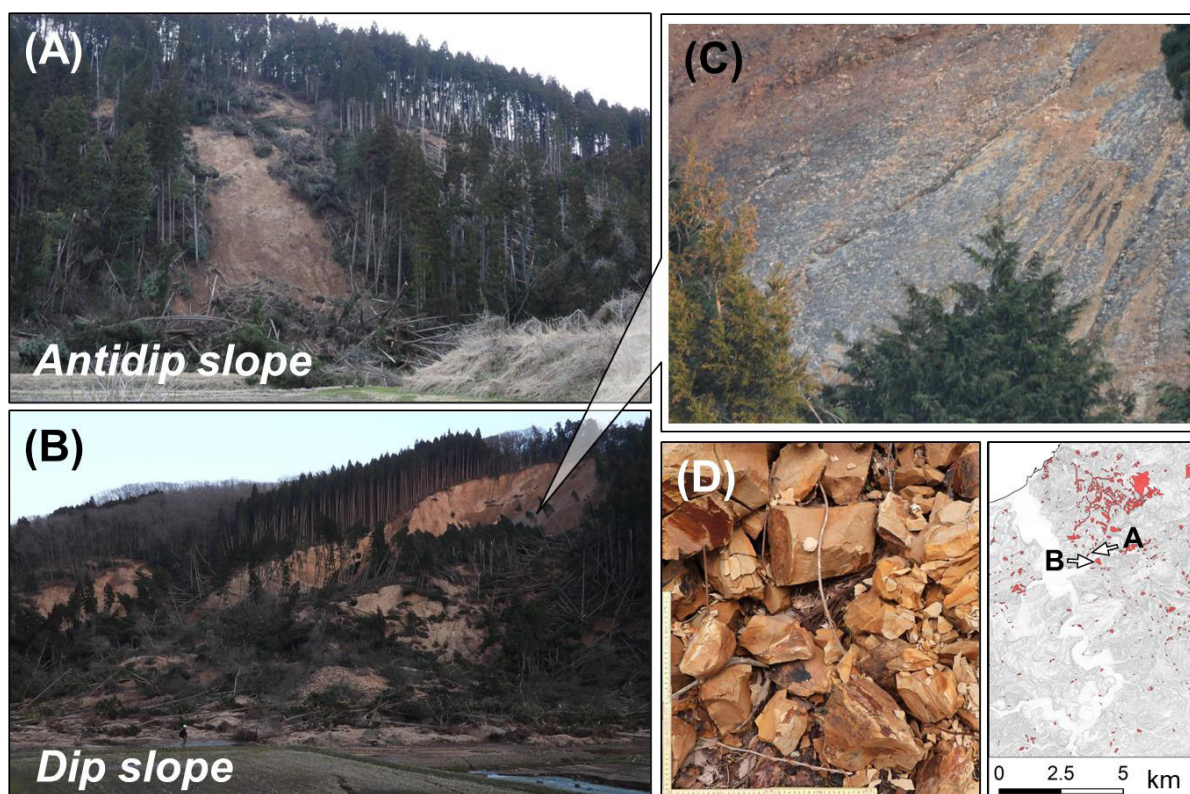


Fig. 8 Landslide types and bedrock weathering features in siliceous siltstone (Iizuka Formation cf. Fig. 3) area.

すべりの発生もみられた (Fig. 7C) . 現地踏査では、この地すべりの主体は珪質泥岩のキャップロックであり、移動土塊縁辺部の白色泥濘の存在から、すべり面は下位にある火砕岩との境界直下の軟弱層準に形成されているものと推察された。こうした地質構造は、当地域の地質図 (吉川ほか, 2002) には記載されていない (cf. Fig. 3) が、崩土岩塊中に海緑石が散在していることからこのキャップロックは飯田層の珪質泥岩であるものと推察される。

火砕岩の岩片を観察すると、ガラス質の基質が水和によって白濁したのち (Fig. 7D) , 元素溶脱と粘土鉱物の生成に伴って全体が軟化する (Fig. 7E) という風化過程が推定される。また火砕岩 (下位) と珪質泥岩 (上位) の境界部では、著しく粘土化した火砕

岩が観察され (Fig. 7F) , 異なる地質体の接触が風化の進行に影響を及ぼしている可能性が推察された。その機構については後述する。

珪質泥岩の分布域では層理面の姿勢と斜面の傾斜方向の関係性によって、斜面変動の様態が異なる。受け盤の斜面では、浅く小規模な崩落 (Fig. 8A) が大多数であるのに対し、受け盤の斜面ではやや深く相対的に規模の大きな地すべり性崩壊 (Fig. 8B) がしばしば見受けられた。地すべり性崩壊のすべり面には暗灰色の泥岩が露出し (Fig. 8C) , それを覆う黄褐色のスレーキング破碎した風化泥岩 (Fig. 8D) とは対照的であった。

風化程度の異なる岩片の化学組成をパイロット分析したところ、風化の過程に対する示唆が得られた。

Table 1 Chemical composition of fragments from mudstone and pyroclastic rock with different weathering grade.

| Sample ID               | Weathering    | Color       | Element mass concentration (wt. %) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|---------------|-------------|------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <i>Mudstone</i>         |               |             | Si                                 | Al    | Fe   | Ca   | Sr   | K    | Ti   | Mn   | Zr   | S    |
| Noto-MS 219a            | Fresh         | Black       | 32.56                              | 6.33  | 4.51 |      | 0.01 | 1.59 | 0.64 |      | 0.02 | 4.51 |
| Noto-MS 220b            | Discolored I  | Dark brown  | 39.75                              | 3.86  | 1.09 |      |      | 0.76 | 0.36 |      | 0.01 | 0.09 |
| Noto-MS 221c            | Discolored II | Light brown | 39.55                              | 4.1   | 1.18 |      |      | 0.74 | 0.36 |      | 0.01 |      |
| <i>Pyroclastic rock</i> |               |             |                                    |       |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Noto-At-a               | Fresh rock    | Gray        | 36.95                              | 5.28  | 1.00 | 0.92 | 0.05 | 2.63 | 0.22 | 0.01 | 0.01 |      |
| Noto-At-b               | Hydrated      | White       | 36.14                              | 5.7   | 1.08 | 1.01 | 0.07 | 3.16 | 0.25 | 0.01 | 0.02 |      |
| Noto-At-c               | Saprolite     | Yellow      | 36.35                              | 6.69  | 2.05 | 0.65 | 0.03 | 0.81 | 0.27 | 0.01 | 0.03 |      |
| Noto-At-d               | Soil          | Brown       | 30.41                              | 11.67 | 2.74 | 0.83 | 0.02 | 2.58 | 0.25 | 0.07 | 0.03 |      |
| Noto-At-e               | Clay          | Cream       | 33.37                              | 9.31  | 3.46 | 1.16 | 0.02 |      | 0.32 | 0.02 | 0.04 |      |

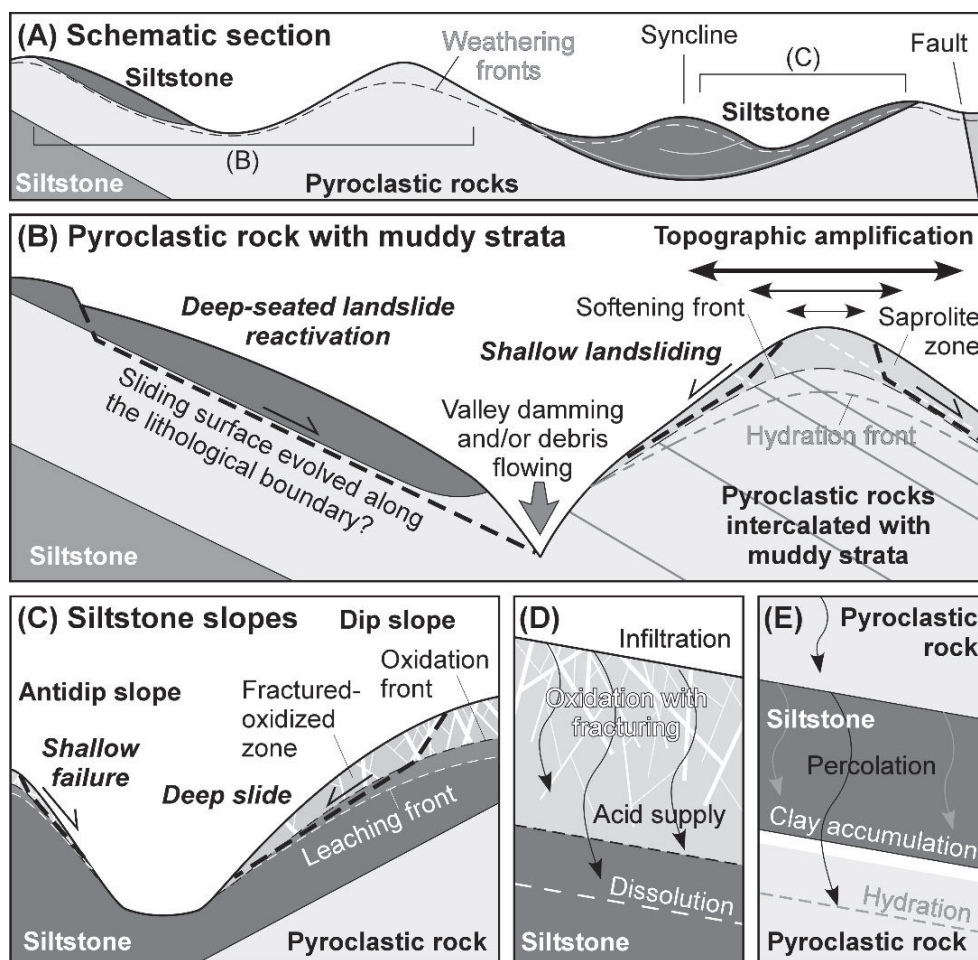


Fig. 9 Schematics illustrating mechanisms of rock weathering and landsliding.

未風化の珪質泥岩には4-5wt.%の鉄と硫黄が含まれ（表1），質量分率の比からみて黄鉄鉱（ $\text{FeS}_2$ ）の存在が示唆される．一般に泥質岩中の黄鉄鉱は地下水との接触に伴い酸化して硫酸を生成し，さらなる元素溶脱や鉱物溶解に寄与する（Chigira, 1990）．風化に伴い，鉄は残存する一方，硫黄は消失している（表1）．硫酸の作用による溶脱・溶解により強度が低下した泥岩は，乾湿サイクルに伴う膨張収縮と亀裂形成およびそこへの鉄（水）酸化物の沈着により，破碎されてゆくものと考えられる．風化による岩盤の強度低下と裂隙水がもたらす水圧が要因となって，流れ盤斜面では酸化前線付近をすべり面とする地すべり性の崩壊が生じた可能性が考えられる．この仮説を検証するためには，風化帯の構造調査や，岩石の風化実験と物性試験などによる多面的な研究が必要であろう．

火砕岩の岩片パイロット分析では，風化ステージの進行に伴って，ケイ素が溶脱し，アルミニウムや鉄が沈積し，チタンやジルコニウムが濃集する傾向にあった．系統的な試料採取と分析によって，風化帯の鉛直プロファイル調べれば，不溶元素の濃度

変化をもとに，化学風化の進行過程が追跡できるかもしれないが，火砕岩は多数回のサージイベントの累積によって形成されるため，初生的な元素組成の差異の取り扱いが課題となるだろう．地震動に伴うせん断変形を増大させる要因となる岩盤中での大きな物性コントラストの成立を理解・予測するうえで，化学風化の進行に伴う強度低下の機構解明が重要であろう．泥質岩との境界部において，火砕岩が著しく風化して粘土化している（Fig. 7F）ことは興味深く，泥質岩のキャップロック地すべり（Fig. 7C）のすべり面形成過程を考察するうえでも，泥岩側からの硫酸供給が作用している可能性の探求には，応用地質学的価値が大いにある．

## 2.5 斜面変動の発生要因に関する予察

火砕岩と珪質泥岩における地形・地盤構造と斜面変動の連関性について予察的な図解をFig. 9に示す．火砕岩は基質部の水和，基質および斑晶の溶解，粘土生成といった連鎖により風化して強度低下し，山頂付近ほど厚く，未風化岩との物性コントラストが大きな風化帯を作り出すものと推察される．これが



地震動の地形増幅効果と相まって、多くの表層崩壊が群発した要因となった可能性がある。珪質泥岩では、黄鉄鉱の酸化による硫酸の生成と鉄（水）酸化物の沈積がスレーキング破碎を加速させる。その結果、受け盤斜面では落石や表層崩壊が頻発する一方、流れ盤斜面では岩盤の排水能力と水貯留容量の増大によるマスムーブメントの頻度低下が、厚い風化帯の形成に寄与した可能性がある。そして地震時には、水理・力学的な物性コントラストの大きい酸化前線付近にすべり面をもつ地すべり性崩壊が生じることになる。これらは現時点では大胆な仮説に過ぎず、今後の調査研究により証拠を得て検証されるべきである。地質情報と地形情報を風化帯の構造および物性と関連付けることで、地震時の斜面変動について場所・規模・閾値の三要素予測への道が拓けるものと期待される。

### 3. 連鎖複合災害のハザード評価

#### 3.1 奥能登豪雨災害の発生

2024年1月1日の地震により被害を受けた能登半島北部地域において、2024年9月21日に記録的豪雨をもたらされ、再び甚大な災害が生じた。顕著な線状降水帯の発生により一時間降雨強度 $>90$  mm/h、発災時雨量 $>300$  mmに達し、半島北部の山間地において新たな斜面変動が多数生じるとともに、先の地震による崩壊地の拡大、裸地の侵食、崩土の再移動が生じ（Figs. 10A, B）、河道閉塞部の決壊も多数発生して、大量の土砂と流木が河道に流入した。地震時に斜面崩壊の少なかった溶岩類や砂勝ち砂泥互層を基盤岩とする場でも、新たな斜面崩壊が多数生じたことは注目に値する。中下流低地では、元来の急峻な流域地形特性に加え、土砂供給による河床の上昇や、流木停滞による水流迂回、地震隆起による北流河川の

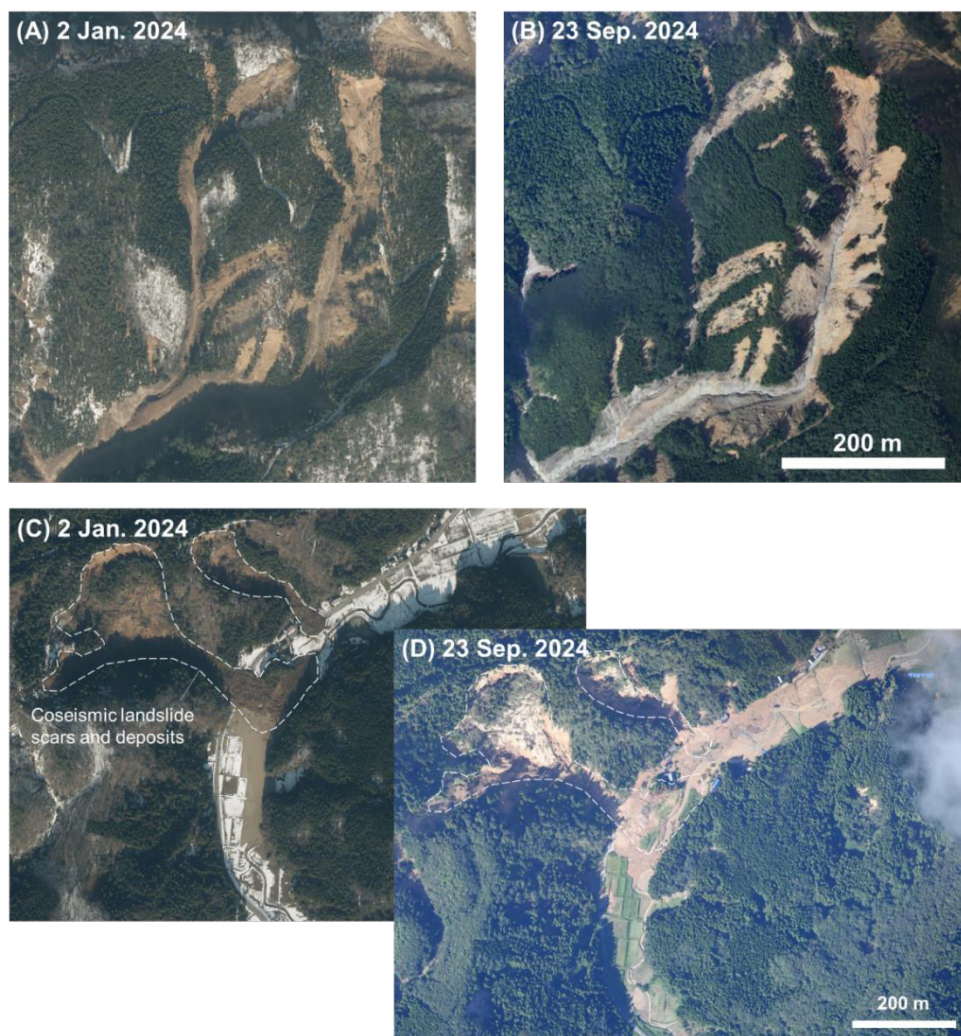


Fig. 10 Landslides enlargement and debris reworking in hillslopes and channels by the subsequent heavy rainfall event in September 2024. See Fig. 11 for the locations. The aerial photos taken by the Geospatial Information Authority (GSI) Japan.



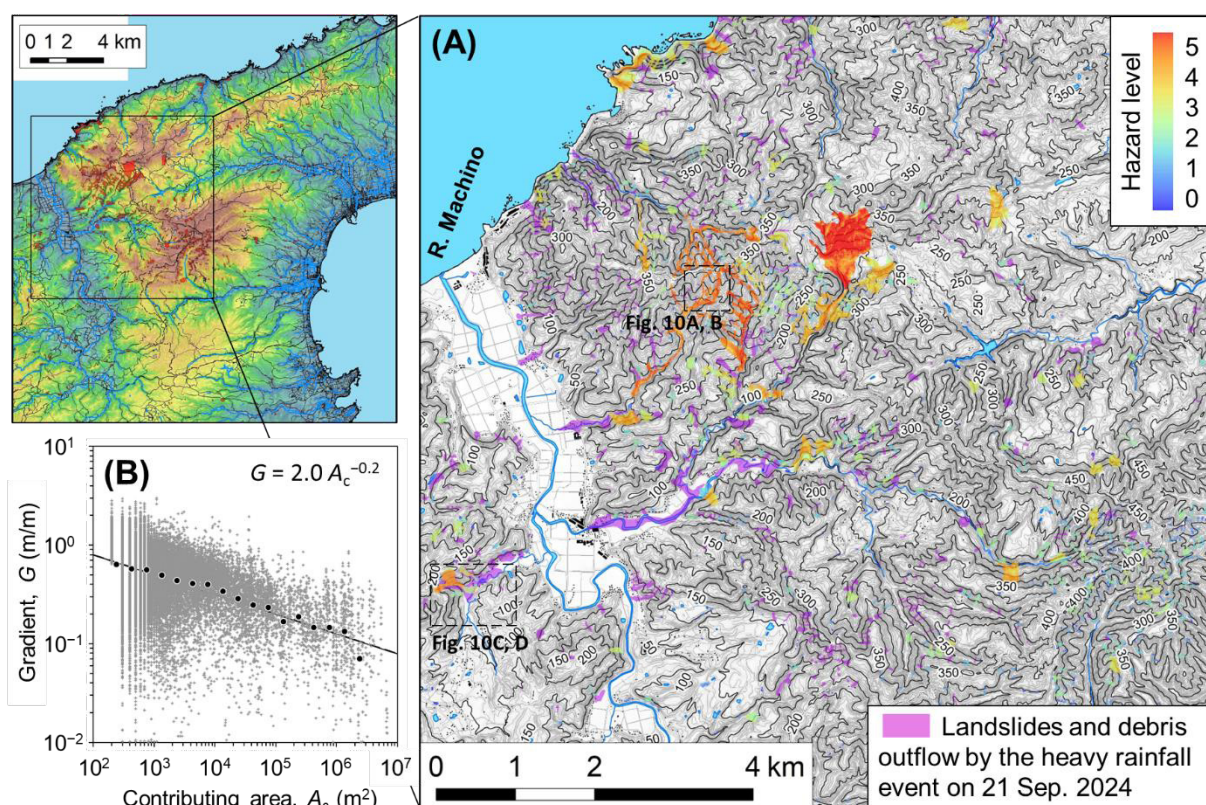


Fig. 11 Relative hazard level evaluation and mapping for the sediment-reworking disaster in the Machino area, northern Noto Peninsula.

勾配減少などの要因が重なって、大規模な土砂・洪水氾濫 (Figs. 10C, D) が同時多発的に生じ、重大な人的被害や家屋被害につながったと考えられる。地震からの復旧途上であった多くのインフラも一部は再び破壊され、地震後に設置された応急仮設住宅も、浸水により被災するに至っている。

2024年能登半島地震の数か月後に生じたこの奥能登豪雨災害は、地震と豪雨および社会要因の重なりによる典型的な連鎖複合災害であり、本稿への加筆 (2024年10月) 時点では、その発災要因と過程にはまだ多くの不明点がある。そのため、発災後の調査研究データに基づいた議論は展開せず、ここでは、崩土の二次移動によるハザードが、地震発生以降の早い時期に予見されていたことに焦点を当て、今後の防減災上の課題を考えてみたい。この論考は、能登半島と地理的条件が類似し、さらに時空間規模の大きな事象となるであろう紀伊半島や四国山地南部における東南海・南海トラフ地震での連鎖複合現象の想定において有意義であると考えられる。

### 3.2 二次的ハザードの暫定マッピング

地震時に発生した斜面変動の分布 (Fig. 2A) は、発災の数日後には既に明らかになっており、融雪出水や夏季の豪雨等による崩土の二次移動がもたらす

長期的なリスクが早い段階で懸念された。ある斜面変動の発生場に属する任意地点に対し、周囲で生産された土砂の体積は、第一次近似的にはその斜面変動の平面積の1.5乗で数値化できるものと考えられる。一方で、その地点での土砂の動きやすさは、地形的急峻度によって定量化できる。地形的急峻度とは対象地点の集水面積で正規化された局所勾配である。これらを組み合わせれば、相対的なハザードの大きさを数量的に評価し、可視化できる可能性がある。

発災直後から、連鎖災害発生の懸念が大きいと判断されたため、特にリスクの高いと思われるFig. 11Aの範囲内で、こうした暫定的な方法によるハザードマッピングを試みた。この範囲における10 mグリッドベースの局所勾配と集水面積の関係はFig. 11Bに示すとおりである。対数ビン内平均のプロットは幂関数で表現できる関係を示し、Fig. 11B中に示した回帰関数を用いて、任意地点の急峻度指数を計算できる。すなわち、地震時崩壊によって生産された土砂の二次移動によるハザードのレベルは、具体的に、

$$L_H = \log_{10} \left[ \frac{G_i A_{ci}^{0.2}}{2.0} a_L^{1.5} \right] \quad (1)$$

と書くことができる。ここで、 $L_H$ はハザードレベ

ル、 $G_i$ は対象地点の局所勾配（－）， $A_{ci}$ はその地点の集水面積（ $m^2$ ）， $a_L$ はその地点が属する斜面変動の平面積（ $m^2$ ）である。

式（1）の計算に基づくハザードマッピングの結果をFig. 11Aに示す。接合する斜面変動の面積が大きく、崩土の存在している場が急峻であるほど、ハザードが高いと評価されている。図中には、2024年9月の奥能登豪雨により生じた土砂移動の痕跡も示した。高ハザードと評価された場所の下流側で、低地への土砂流出が生じていることがわかる。すなわち、相当おおまかな定量化に過ぎないこうした方法でも、土砂・洪水氾濫現象のリスク把握に、それなりに援用できる可能性のある予測評価となっていたことがわかる。

こうした計算が行われたのは、2024年1月末であって、奥能登豪雨の発災までには、半年以上の猶予があった。それにも関わらず、筆者はこの情報を喧伝しようとはしなかったし、それゆえ所属機関外で有効活用されるような機会もなかった。なぜだろうか。それは、こうした定量化や可視化あるいはその結果を、単に、二次災害のリスクがあるということを不特定の人々に説明するための方法あるいは材料としか捉えていなかったためである。すなわち研究者が行う災害現象の事後解析や予測評価と、それを防減災のために実践的に使う社会還元との間には大きなギャップがある。研究者は、常に探求の途上に居て、現在進行形の知見や技術の提示はできるが、それが未完成のものなれば基本的に実用を試みようとはしないし、その任にもないと認識している。一方、行政機関や地域社会の実務者・当事者は、現状、研究途上の知見や技術・情報をリアルタイムに取り込み、現場の実情に合わせて最適化する術も由もない。これでは永遠にギャップは埋まらない。

僻地での巨大地震発生後、数か月以内に完成し、 $10^5 m^3$ の土砂を止めることのできる人工構造物は存在しない。また、こうした巨大地震により生産された土砂を、氾濫堆積させることなく、全て流下させられる河川は無い。地形学的にみてこれらは自明であるにも関わらず、研究者、行政担当者、地域住民の全てに存在する確証バイアス・正常性バイアスが障壁となる。これにより、可能性があると分かっているのに具体的に事象やシナリオを想定できず、情報があるのに我が事として捉えられないという事態が生じる。連鎖複合災害に対する防減災実現には、この障壁を乗り越えるべく、地球科学・土木工学・人文社会学の協働による諸事象の機構と過程の理解および災害の予測評価の高度化と実効的な社会還元

方法の開拓が望まれる。その道程においては、

- 1) ハザードをダイナミックに可視化したリスクコミュニケーションツールの開発
- 2) 地域社会へと知見・技術を実践的に媒介する学官産連携プレーヤーの育成
- 3) これらを活用した社会的反復学習（ローカライズされた災害事象想定と対応トライアル訓練）が必要不可欠と考えられる。

## 謝 辞

発災後速やかに斜面変動のインベントリマップを作成し、公開した国土地理院に敬意と感謝を表す。本研究は、東京大学地震研究所と京都大学防災研究所の拠点間連携共同研究（2024-K-02）、JSPS科研費（21KK0015、23K20543）および国土交通省の河川砂防技術研究開発 地域課題分野（砂防）による助成を受けた。

## 参考文献

- 井上卓彦・尾崎正紀・岡村行信（2010）：能登半島北部域20万分の1海陸シームレス地質図及び地質断面図，海陸シームレス地質情報集「能登半島北部沿岸域」，地質調査総合センター。
- 太田陽子・平川一臣（1979）：能登半島の手成段丘とその変形。地理学評論，第52巻，4号，pp. 169–189。
- 国土地理院（2024）：令和6年(2024年)能登半島地震に関する情報。  
[https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101\\_noto\\_earthquake.html](https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/20240101_noto_earthquake.html)
- 吉川敏之・鹿野和彦・柳沢幸夫・駒澤正夫・上嶋正人・木川栄一（2002）：珠洲岬，能登飯田及び宝立山地域の地質。地域地質研究報告 5 万分の1地質図幅，金沢（10）第 3・4,6,7 号 NJ-53-4-11・15,12,16。
- Chigira M. (1990): A mechanism of chemical weathering of mudstone in a mountainous area. Engineering Geology, Vol. 29, pp. 119–138.
- Fukushima, Y., D. Ishimura, and N. Takahashi (2024): Ground deformation analysis results using ALOS-2 SAR data for the 1 January 2024 Noto-Hanto, Japan, earthquake.  
<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.24960711>.

（論文受理日：2024年10月30日）