

**第 62 回自然災害科学総合シンポジウム**  
**(2025 年度防災研究所 重点推進型共同研究)**

**講演論文集**

**2025 年 10 月 8 日 (水)**

**主催**

**京都大学防災研究所 自然災害研究協議会**

# 第 62 回自然災害科学総合シンポジウム

主催： 京都大学防災研究所自然災害研究協議会  
日程： 令和 7 年 10 月 8 日（水）（13：00-17：00）  
場所： きはだホール（京都大学宇治キャンパス内）および Zoom によるハイブリッド開催  
備考： 本シンポジウム は、土木学会認定 CPD プログラムです。

## プログラム

開会挨拶 自然災害研究協議会議長 大湊 隆雄（東京大学地震研究所）

所長挨拶 堀 智晴（京都大学防災研究所）

13：10～14：00

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究令和 6 年度報告】  
「2023 年 5 月 5 日の地震を含む能登半島北東部陸海域で継続する地震と災害の総合調査」 その 2  
平松 良浩（金沢大学）

14：05～14：45

【防災研究所共同研究・地域防災実践型共同研究】  
「防災 DX 時代における行政の意思決定を支援するための新たな情報可視化アプローチの開発と実践  
（経過報告）」  
齊藤 正人（埼玉大学社会変革研究センター・レジリエント社会研究部門）

14：45～15：00 休憩

15：00～15：50

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】  
「2024 年能登半島地震により発生した地震地すべりの地質要因について  
—主に崩壊深度 5m 以上の深い地震地すべりを対象として—」  
荒井 紀之（京都大学防災研究所）

15：55～16：45

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】  
「Post-Flood Survey and Hazard Mapping of the Cagayan River Basin: An Integrated RRI Modeling  
and Community-Based Approach」  
KANTOUSH Sameh Ahmed（京都大学防災研究所）

閉会挨拶 王 功輝（京都大学防災研究所）

## 目次

- 【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究令和6年度報告】
- 「2023年5月5日の地震を含む能登半島北東部陸海域で継続する地震と災害の総合調査  
その2 …… 1  
平松 良浩（金沢大学）
- 【防災研究所共同研究・地域防災実践型共同研究】
- 「防災DX時代における行政の意思決定を支援するための新たな情報可視化  
アプローチの開発と実践」 …… 16  
齊藤 正人（埼玉大学社会変革研究センター・レジリエント社会研究部門）
- 【自然災害研究協議会突発災害調査報告】
- 「2024年能登半島地震により発生した地震地すべりの地質要因について  
—主に崩壊深度5m以上の深い地震地すべりを対象として—」 …… 26  
荒井 紀之（京都大学防災研究所）
- 【自然災害研究協議会突発災害調査報告】
- 「Post-Flood Survey and Hazard Mapping of the Cagayan River Basin:  
An Integrated RRI Modeling and Community-Based Approach」 …… 37  
KANTOUSH Sameh Ahmed（京都大学防災研究所）

## 2023年5月5日の地震を含む能登半島北東部陸海域で継続する 地震と災害の総合調査 その2

平松良浩<sup>1</sup>・岡田知己<sup>2</sup>・吉田圭佑<sup>2</sup>・高木涼太<sup>2</sup>・篠原雅尚<sup>3</sup>  
・酒井慎一<sup>4</sup>・蔵下英司<sup>3</sup>・西村卓也<sup>5</sup>・太田雄策<sup>2</sup>・木下陽平<sup>6</sup>  
・宮崎真一<sup>7</sup>・後藤忠徳<sup>8</sup>・笠谷貴史<sup>9</sup>・吉村令慧<sup>5</sup>・田中愛幸<sup>10</sup>  
・宮澤理稔<sup>5</sup>・荒木英一郎<sup>11</sup>・森下知晃<sup>1</sup>・鹿児島涉悟<sup>12</sup>・石山達也<sup>2</sup>  
・立石 良<sup>13</sup>・安江健一<sup>13</sup>・廣内大助<sup>14</sup>・松多信尚<sup>15</sup>・宍倉正展<sup>16</sup>  
・岩田知孝<sup>5</sup>・浅野公之<sup>5</sup>・大堀道広<sup>17</sup>・村田 晶<sup>1</sup>・石川浩一郎<sup>18</sup>  
・山岸邦彰<sup>19</sup>・須田達<sup>19</sup>・山崎新太郎<sup>5</sup>・青木賢人<sup>20</sup>・林 紀代美<sup>20</sup>  
・武田公子<sup>21</sup>・田中純一<sup>22</sup>・井口克郎<sup>23</sup>・佐々木大輔<sup>24</sup>・原 裕太<sup>24</sup>  
・吉田 浩<sup>25</sup>・松本 聡<sup>26</sup>・江本賢太郎<sup>26</sup>・山中佳子<sup>27</sup>・勝俣 啓<sup>28</sup>  
・前田拓人<sup>29</sup>・石瀬素子<sup>30</sup>・古谷 元<sup>31</sup>・小林俊一<sup>1</sup>・高原利幸<sup>32</sup>  
・金澤伸一<sup>33</sup>・保坂吉則<sup>33</sup>・王 功輝<sup>5</sup>・卜部厚志<sup>34</sup>・片岡香子<sup>34</sup>  
・高清水康博<sup>35</sup>・永松伸吾<sup>36</sup>・由比政年<sup>1</sup>・犬飼直之<sup>37</sup>・榎田真也<sup>1</sup>  
・有田 守<sup>32</sup>・馬場俊孝<sup>38</sup>・二宮順一<sup>1</sup>・郷右近英臣<sup>39</sup>・林 豊<sup>40</sup>  
・多々納裕一<sup>5</sup>・梶谷義雄<sup>41</sup>・中山晶一郎<sup>42</sup>・藤生 慎<sup>42</sup>

- 1 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系
- 2 東北大学大学院理学研究科
- 3 東京大学地震研究所
- 4 東京大学大学院情報学環
- 5 京都大学防災研究所
- 6 筑波大学システム情報系
- 7 京都大学大学院理学研究科
- 8 兵庫県立大学大学院理学研究科
- 9 海洋研究開発機構海洋機能利用部門
- 10 東京大学大学院理学研究科
- 11 海洋研究開発機構海域地震火山部門
- 12 富山大学学術研究部理学系
- 13 富山大学学術研究部都市デザイン学系
- 14 信州大学学術研究院教育学系
- 15 岡山大学学術研究院教育学域
- 16 産業技術総合研究所地質調査総合センター
- 17 滋賀県立大学環境科学部
- 18 福井大学学術研究院工学系部門
- 19 金沢工業大学建築学部
- 20 金沢大学人間社会研究域地域創造学系
- 21 金沢大学人間社会研究域経済学経営学系
- 22 北陸学院大学社会学部
- 23 神戸大学大学院人間発達環境学研究科
- 24 東北大学災害科学国際研究所
- 25 東北大学大学院経済学研究科
- 26 九州大学大学院理学研究院
- 27 名古屋大学大学院環境学研究科

- 28 北海道大学大学院理学研究院
- 29 弘前大学大学院理工学研究科
  - 30 山形大学理学部
  - 31 富山県立大学工学部
  - 32 金沢工業大学工学部
- 33 新潟大学教育研究院自然科学系
- 34 新潟大学災害・復興科学研究所
- 35 新潟大学教育研究院人文社会科学系
- 36 防災科学技術研究所災害過程研究部門
- 37 長岡技術科学大学大学院工学研究科
- 38 徳島大学大学院社会産業理工学研究部
- 39 北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科
  - 40 気象庁気象研究所地震津波研究部
  - 41 香川大学創造工学部
  - 42 金沢大学融合研究域融合科学系

## 要 旨

能登半島北東部では、2020年末から地殻変動を伴う群発地震活動が継続する中で、2023年5月5日にマグニチュード6.5（最大震度6強）の地震が発生した。この地震活動や地殻変動の発生メカニズムおよびその災害像や地域社会・地域経済への影響を明らかにするために、令和5年度科学研究費助成事業（特別研究促進費）による総合調査として、地震観測、測地観測、電磁気観測、重力観測、温泉成分測定、活構造調査、強震観測、震災被害調査、地域社会影響調査が実施された。さらに2024年1月1日にはマグニチュード7.6（最大震度7）の地震が発生し、総合調査の期間が1年延長され、津波調査、地域経済・復興過程影響調査が追加された。本稿では、この総合調査によって得られた主として令和6年度の成果について報告する。

### 1. はじめに

能登半島北東部では、2020年末から地震活動域の拡大を伴う地震活動の活発化と局所的な地殻変動が継続する中、2022年6月19日にマグニチュード（M）5.4、最大震度6弱の地震が発生した。この地震活動や地殻変動の要因、災害像の解明のため、令和4年度科学研究費助成事業（特別研究促進費）「能登半島北東部において継続する地震活動に関する総合調査」が行われた（平松ら、2023）。

2023年5月5日にはM6.5、最大震度6強の地震が発生し、この地震後に地震活動域は北側の海域に大きく拡大した。この地震の発生メカニズムや災害像の調査観測が令和5年度科学研究費助成事業（特別研究促進費）「2023年5月5日の地震を含む能登半島北東部陸海域で継続する地震と災害の総合調査」により実施された（平松ら、2024）。

そして、2024年1月1日にこれまでの群発地震活動域を震源とするM7.6、最大震度7の地震が発生した。強い地震動による建造物の倒壊や斜面崩壊、液状化、火災および津波により、石川県、富山県、新潟県にお

いて大きな被害が生じた。これら3県での人的被害は死者634人（うち災害関連死406人）、行方不明者2人、重傷者420人、軽傷者963人であり、住家被害は全壊6,532棟、半壊23,668棟、一部破損134,089棟であった（令和7年8月5日16時現在）（内閣府、2025）。また、道路の寸断や能登半島の日本海側の海岸でのメートルオーダーの地盤隆起による港湾機能の喪失が多数発生し、その結果多くの孤立集落が生じ、半島型の災害として注目された。このM7.6の地震の発生を受けて、科学研究費助成事業（特別研究促進費）の総合調査に対する追加助成と研究期間の令和6年度末までの延長がなされ、研究分担者および研究テーマの追加が行われた（平松ら、2024）。本稿では、昨年度の報告（平松ら、2024）に引き続き、科学研究費助成事業（特別研究促進費）「2023年5月5日の地震を含む能登半島北東部陸海域で継続する地震と災害の総合調査」により得られた主として令和6年度の成果について報告する。

### 2. 研究計画の概要

表1 12のテーマの研究分担者

<p>テーマ1</p> <p>岡田 知己 高木 涼太 吉田 圭佑 松本 聡 江本 賢太郎 山中 佳子 勝俣 啓 前田 拓人 石瀬 素子</p>	<p>東北大学大学院理学研究科 東北大学大学院理学研究科 東北大学大学院理学研究科 九州大学大学院理学研究院 九州大学大学院理学研究院 名古屋大学大学院環境学研究科 北海道大学大学院理学研究院 弘前大学大学院理工学研究科 山形大学理学部</p>	<p>テーマ9</p> <p>村田 晶 石川浩一郎 山岸 邦彰 須田 達 山崎新太郎 古谷 元 小林 俊一 高原 利幸 金澤 伸一 保坂 良則 王 功輝 卜部 厚志 片岡 香子 清水 康博</p>	<p>金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 福井大学学術研究院工学系部門 金沢工業大学建築学部 金沢工業大学建築学部 京都大学防災研究所 富山県立大学工学部 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 金沢工業大学工学部 新潟大学工学部 新潟大学教育研究院自然科学系 京都大学防災研究所 新潟大学災害・復興科学研究所 新潟大学災害・復興科学研究所 新潟大学教育研究院人文社会科学系</p>
<p>テーマ2</p> <p>篠原 雅尚 蔵下 英司 酒井 慎一</p>	<p>東京大学地震研究所 東京大学地震研究所 東京大学大学院情報学環</p>	<p>テーマ10</p> <p>青木 賢人 林 紀代美 武田 公子 田中 純一 井口 克郎 佐々木大輔 原 裕太 吉田 浩 永松 伸吾</p>	<p>金沢大学人間社会研究域地域創造学系 金沢大学人間社会研究域地域創造学系 金沢大学人間社会研究域経済学経営学系 北陸学院大学社会学部 神戸大学大学院人間発達環境学研究科 東北大学災害科学国際研究所 東北大学災害科学国際研究所 東北大学大学院経済学研究科 防災科学技術研究所・災害過程研究部門</p>
<p>テーマ3</p> <p>西村 卓也 太田 雄策 木下 陽平 宮崎 真一</p>	<p>京都大学防災研究所 東北大学大学院理学研究科 筑波大学システム情報系 京都大学大学院理学研究科</p>		
<p>テーマ4</p> <p>後藤 忠徳 笠谷 貴史 吉村 令慧</p>	<p>兵庫県立大学大学院理学研究科 海洋研究開発機構海洋機能利用部門 京都大学防災研究所</p>		
<p>テーマ5</p> <p>田中 愛幸 宮澤 理稔 荒木英一郎</p>	<p>東京大学大学院理学研究科 京都大学防災研究所 海洋研究開発機構海域地震火山部門</p>	<p>テーマ11</p> <p>由比 政年 犬飼 直之 榎田 真也 有田 守 馬場 俊孝 二宮 順一 郷右近 英臣 林 豊</p>	<p>金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 長岡技術科学大学環境社会基盤系 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 金沢工業大学工学部 徳島大学大学院社会産業理工学研究部 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 北陸先端科学技術大学院大学先端科学技術研究科 気象庁気象研究所地震津波研究部</p>
<p>テーマ6</p> <p>鹿児島渉悟 森下 知晃</p>	<p>富山大学学術研究部理学系 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系</p>		
<p>テーマ7</p> <p>石山 達也 立石 良 安江 健一 廣内 大助 松多 信尚 穴倉 正展</p>	<p>東京大学地震研究所 富山大学学術研究部都市デザイン学系 富山大学学術研究部都市デザイン学系 信州大学学術研究院教育学系 岡山大学学術研究院教育学域 産業技術総合研究所地質調査総合センター</p>		
<p>テーマ8</p> <p>岩田 知孝 浅野 公之 大堀 道広</p>	<p>京都大学防災研究所 京都大学防災研究所 滋賀県立大学環境科学部</p>	<p>テーマ12</p> <p>多々納 裕一 梶谷 義雄 中山 晶一朗 藤生 慎</p>	<p>京都大学防災研究所 香川大学創造工学部 金沢大学融合研究域融合科学系 金沢大学融合研究域融合科学系</p>

本総合調査は以下の12のテーマからなり、地震学、測地学、地球電磁気学、岩石学、地球化学、変動地形学、地質学、強震動地震学、地震工学、建築構造学、耐震工学、木構造工学、応用地質学、自然災害科学、地盤工学、地すべり学、自然地理学、人文地理学、地方財政論・経済学、災害社会学、社会保障論、国際防災学、農村計画学、加齢経済学、災害社会科学、海岸工学、水難工学、防災工学、災害経済分析、リスクマネジメント、未来社会デザイン、防災計画を専門とする全33機関、計68名の研究者が研究分担者として参加した(表1)。テーマ11と12はM7.6の地震後の追加助成の際に追加されたテーマである。

- テーマ1 陸域地震観測による震源域の断層帯および流体供給系の分布・挙動の解明
- テーマ2 海陸統合臨時地震観測による群発地震活動の把握
- テーマ3 測地観測による地殻変動メカニズムの解明
- テーマ4 群発地震域～M7.6地震破壊域における流体分布把握のための海陸電磁気観測
- テーマ5 超高感度地殻活動観測による地殻流体挙動の解明
- テーマ6 温泉水の化学分析による能登半島の物質循環像の調査
- テーマ7 活構造調査による震源域の古地震活動像の解明
- テーマ8 震源過程と強震観測に基づく高震度生成過程調査
- テーマ9 震災による被害状況の調査と再建に関する検討
- テーマ10 社会的脆弱性による災害時の地域への影響調査
- テーマ11 津波の生成・伝播・遡上特性の解明と断層破壊過程の推定
- テーマ12 地域経済への影響と復興過程の調査

### 3. 研究成果の概要

#### 3.1 陸域地震観測による震源域の断層帯および流体供給系の分布・挙動の解明

地震観測データの解析から、2024年能登半島地震が、群発地震が微小亀裂を通じて深部から浅部に移動し大断層に侵入した周辺で開始したことを示した(Yoshida et al., 2024)。計算コストの高い高精度震源再決定を、低計算コスト・準リアルタイムで行うアルゴリズムを作成し、能登半島の群発地震に適用した(Matsumoto and Yoshida, 2024)

能登半島北東部の低プーゲー重力異常域の直下・2024年M7.6地震震源や2023年M6.5地震震源およびそれらの余震・断層モデルの深部に、高Vp、(低Vs、)高Vp/Vs領域が確認でき、その原因として第三紀に形成されたカルデラの古いマグマ溜まりとそこに存在する流体が考えられる(岡田ら, 2024)。地震計ノードを用いた稠密地震観測データに常時微動表面波トモグラフィーを適用し、M7.6地震および先行した群発地震を規定した不均質構造を明らかにした(高木ら, 2024)。2024年能登半島地震に伴う地震波速度の変化を明らかにした(Parisら, 2024)。

臨時地震観測によるComposite Focal Mechanismや応力インバージョンの結果から、2023年M6.5以前から西側と東側でのP軸方位が異なっていたこと、M6.5発生後は震源域付近で方位が乱され、主応力方向の回転、 $\sigma_1$ の減少や $\sigma_3$ の増加が見られていたこと、2024年M7.6発生後はP軸方位の均質化がみられたことが明らかとなった(松本ら, 2024)。

これらの成果は、震源域での臨時観測や高精度推定手法の開発による本研究独自のものであり、地震活動や震源域の構造と応力場等のその背景を知るための重要な知見となった。今後も引き続き、取得されたデータを活用した多様な研究成果が得られることが期待される。

#### 3.2 海陸統合臨時地震観測による群発地震活動の把握

##### 3.2.1 令和6年能登半島地震の海域緊急余震観測

令和6年能登半島地震後に能登半島東方の海域に広がった余震活動の詳細を明らかにするために、自由落下自己浮上式海底地震計(OBS)による海域緊急余震観測を実施した(Shinohara et al., 2025)。2024年1月に34台のOBSを設置し、約1ヶ月後に26台の短周期OBSを回収した。気象庁が震源決定した情報を基に、絶対走時を用いる震源決定と、double-difference法を組み合わせ、震源を再決定した。さらに、初動極性を用いて発震機構解を決定した。

得られた余震分布より、震源は、主に深さ0.2 kmから17 kmに分布しており、主に上部地殻内で発生していた。余震分布は傾いた面を形成し、その面は日本海地震・津波調査プロジェクトで構築された地震発生断層モデルと良く一致していた。多くの逆断層型の余震とともに、横ずれ型の余震も数多く発生していた。横ずれ型を含めて多くの余震の最大圧縮軸はモデル断層と直交していた。初動解では横ずれ型に決定された余震の一部については、非ダブルカップル成分が多く含まれる逆断層型であることが示

されている(Akuhara et al., in press)。

### 3.2.2 令和6年能登半島地震震源域最西端における海陸統合地震観測

令和6年能登半島地震震源域の西部では、志賀町西方の海域まで震源域が広がった。そこで、志賀町西方沖の4ヶ所に浅海用係留ブイ方式海底観測システムを設置した。海域の観測は、2024年8月3日から2024年8月26日まで実施し、同時に陸域では、志賀町、輪島市に10台の独立型地震観測装置を設置することで、稠密な海陸統合地震観測網を構築した。これら海域と陸域に設置した臨時オフライン観測点と、能登半島西部のテレメータ観測点（11ヶ所）で得られている波形データから気象庁一元化震源カタログに基づいたイベント毎へのデータ編集作業を実施した。P波、S波の検出作業を実施して得た走時データを用いて地震波トモグラフィ解析を実施し、余震分布と3次元速度構造を得た。

得られた余震分布は、気象庁一元化震源分布より浅くなる傾向があり、余震の大部分は日本海地震・津波調査プロジェクトで構築された地震発生断層モデルで推定された断層面の上盤側に分布した。また、震源域の西端部における余震分布は、高速度領域の上面に沿って北西方向に傾斜した面を形成した。

### 3.3 測地観測による地殻変動メカニズムの解明

能登半島の8か所でGNSS臨時観測を継続するとともに、国土地理院GEONET、SoftBank独自基準点のデータを合わせた統合解析を行い、2024年能登半島地震後の地殻変動のモニタリングを継続した。地震後の地殻変動の主原因は、マンツルの粘弾性緩和であることを明らかにするとともに、地震後も長期間余効変動が継続し、能登半島北部での沈降量は地震後50年間で30 cmを超えることがわかった。

複合測地観測データに基づいて2024年能登半島地震本震の地震時すべり分布の推定を行った。その結果、仮定した断層面の東西に二つのピークを持つすべり分布が推定された。単純な平面断層とリストラック断層の双方で観測を良好に説明可能であり、震源断層の幾何は両モデルが成立し得ることが示された(Yamada et al., 2025)。ソフトバンク独自基準点を含む稠密GNSS観測網を用いて、2024年能登半島地震後の佐渡島における地震後余効変動の特徴を精査した。その結果、佐渡島における地震後の北西向きの変位は粘弾性緩和のみでは説明できず、余効すべりが主たる要因であることを明らかにした(Ohtate et al., 2025)。

InSAR解析およびInSAR時系列解析により、群発地震活動期と2023年M6.5地震による地殻変動分布を検出した。検出データに基づいて、群発地震に対しては変動源モデリングを、2023年の地震に対してはすべり分布インバージョンを行った(Kinoshita, 2025)。また群発地震の変動源が2023年地震で破壊を起こした断層面に及ぼしたクーロン破壊応力変化を計算し、その結果は地震発生を促進する応力変化であった。令和6年能登半島地震による地震時および地震後地殻変動をSARデータを用いて解析し、地震後地殻変動については余効変動と見られる地表面変位をInSARにより検出した。

### 3.4 群発地震域～M7.6地震破壊域における流体分布把握のための海陸電磁気観測

奥能登での群発地震活動域および2024年1月1日のM7.6地震の震源域に関して、発生場の地下比抵抗構造の分解能向上を目的に、2024年度は海底地磁気地電流観測を5点において実施した。実施に際しては、1月1日の地震に伴う奥能登北岸の隆起により調査船の寄港が困難であったため、能登町および珠洲市の南方沖に展開することにより群発地震域の南北方向の深部構造の分解能の向上を目指した配置とした。設置および回収は無事完了し、リモートリファレンス処理を含む時系列解析により、数10秒から数1,000秒の帯域で良質なMT応答を得た。現在、2021年度からの奥能登東部での一連の観測による陸上・海域MT応答に加え、2007年度に取得した奥能登西部の陸上MT応答を統合した計93点のデータについて、地下比抵抗モデルの逆解析を進めている。

群発地震活動の消長に伴う地下比抵抗構造の変化モニタリング可能性の検証のために、2022年11月から継続している電磁場連続観測について、2024年1月1日の地震発生後も、4地点において観測を継続した。2024年の地震や、その後の降雨災害等により、一部欠測が生じたが、その影響は最小限に抑えることができた。2024年地震の前後で顕著な変化は確認できなかったが、長期的な変動として2023年5月5日の地震前後に、地磁気変換関数（地磁気水平成分と鉛直成分の比）に有意な変化を検出した。この変化に関して、地下構造に起因する変化か否かについての検証を進めている。

### 3.5 超高感度地殻活動観測による地殻流体挙動の解明

#### 3.5.1 重力観測

2023年度の観測により得られた重力データを詳細

に解析し、2023年のM6.5および2024年のM7.6地震前後に生じた重力異常を評価した。その結果、M6.5地震では珠洲市北部、M7.6地震では珠洲市北部から輪島験潮場にかけて負の有意な重力異常が認められた。これらの重力異常は、従来の弾性体理論では説明できないことが分かり、地殻流体移動に基づくモデルを構築することで説明を試みた。M6.5地震では、重力異常とGNSS変位は、地震前に蓄積されていた流体量 (Nishimura et al., 2023) の約1/10が浅部に向けて上方移動したと考えると定量的に説明が可能である (Tanaka et al., 2025)。また、M7.6地震では、GNSSとSARから求められたせん断すべりモデルでは説明できない北向きの変位が能登半島北部の沿岸域に残っていることが判明し、M6.5地震前に蓄積していた流体の約1/3がVp/Vs比の高い浅部領域に移動したと考えることで、この変位と重力異常とを説明しうることが分かった。

### 3.5.2 光ファイバセンシング

珠洲市内の廃線トンネルにおける、光ファイバセンシング技術を用いた地殻活動の観測を継続した。地殻流体の挙動に伴う地殻変動を捉えるには、温度補正の問題が欠かせない。また、能登町～珠洲市に設置されている約28 kmの光ファイバケーブルを、分布型音響センシング(DAS)技術により測定し、地震活動に伴う波動場を超高密度で捉えた。M7.6地震による地震動を受けても、光ファイバケーブルは地中・地表区間共にM7.6地震前と同じ条件で測定する事が確認され、この方法が大地震後の迅速な余震観測に適用可能な事が示された。

## 3.6 温泉水の化学分析による能登半島の物質循環像の調査

### 3.6.1 温泉水の科学分析

Amezawa et al. (2023) において深部流体の供給源が直下に存在する可能性が指摘されている。震源集中域cluster S上と近傍に位置する2点の温泉で定期的に試料採取を行い、化学・同位体組成を測定した。希ガス同位体組成(He, Ne)、陰イオン濃度(Cl, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)、水の酸素・水素同位体比について2022年6月以降の時間変動を解析した。Cluster S上に位置する温泉では、陰イオン濃度、δ<sup>18</sup>O値、δD値が2022年から2023年5-10月にかけて低下し、その後2024年1月以降にかけて上昇した。これは地震活動に伴い岩盤の透水性が変化し、異なる帯水層の成分が混入した過程を反映したものと考えられる。また大気成分を補正したヘリウム同位体比 (<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比) について、2点の温泉はベースラインとして3.1 Ra, 5.0 Raの値 (1 Ra: 大気

<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比) を持っていたが、2022年から2023年5-7月にかけてそれぞれ2.3 Ra, 4.3 Raまで低下し、その後2024年1月まで上昇してベースラインの値に戻った。一時的な<sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He比の低下は、岩盤の変形に伴い<sup>4</sup>Heに富む岩石起源成分が帯水層に付加された可能性を示唆する。このような化学データの異常として検出されるほどの歪みの蓄積が、M7.6地震の発生に関与した可能性が考えられる。

### 3.6.2 火山岩類の分析

温泉水に含まれるヘリウムの起源を推定する上で、能登半島の地殻に含まれる <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比を調査することは重要である。能登半島北東部および門前の8ヶ所の露頭で産出した火山岩・変成岩の <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比を測定したところ、いずれも大気値 (1 Ra) よりも低かった。一般的に大陸地殻は、岩石中のウランやトリウムの放射壊変に伴う α 粒子 (<sup>4</sup>He) の放出により、上部マントル (8 Ra) や大気よりも低い <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比を持つ。よって、能登半島の地殻も放射壊変の影響を受けた低い <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比を持つと考えられる。これは、能登半島の温泉で観測される高い <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比がマントル起源成分の混入によるもの (Umeda et al., 2024) であることを支持する結果であり、上述のように、2022-2023年にかけて観測された <sup>3</sup>He/<sup>4</sup>He 比の低下は岩石成分の付加によるものであるという可能性を示唆する。

## 3.7 活構造調査による震源域の古地震活動像の解明

令和6年能登半島地震に伴う海岸隆起に関する調査とこの地震の際に若山川沿いに現れた断層崖の掘削調査の成果について述べる。

### 3.7.1 能登半島北岸の隆起に関する調査

離水生物遺骸、とくに紅藻ピリヒバの離水に伴う白化を指標とした隆起量計測から、2024年1月1日M7.6の地震に伴う能登半島北岸の隆起量分布を明らかにした。この分布は、井上・岡村 (2010) の海域活断層セグメント、および宍倉ら (2020) による低位段丘面群の旧汀線高度分布とも部分的に整合しており、低位段丘面群が海域活断層によるM7以上の地震の繰り返しにより形成されたことを示唆する (立石, 2025)。

能登半島北岸の東端部付近の堂ガ崎において、ノッチなどの海食地形にヤッコカンザシの群集を複数の高さで発見し、一部は2023年5月5日と2024年1月1日の地震で離水したものと判断した (後藤ら, 2025)。さらに上位で発見した群集の年代測定結果から

AD1694-1929の間に隆起イベントが発生したと考えられる(後藤ら, 2025)。また, ピット掘削により低位段丘面の構成層から海浜砂層を採取することができた。このように試料採取を進めて年代測定を行い, 海域活断層の過去の活動時期と活動域の解明を目指すことが重要となる。

### 3.7.2 若山川沿いに出現した断層崖に関する調査

2024年1月1日M7.6の地震の際に珠洲市若山川沿いで出現した断層崖を対象に, 珠洲市若山町宗末地区においてトレンチ掘削調査を実施した。掘削地点は, 1965年撮影の空中写真において崖地形が認められ, その崖は2024年1月1日に出現した断層崖と重なる。

トレンチ壁面には, 断層崖付近を境に南側に割れ目が発達するシルト岩が分布し, 北側に円礫層・角礫層・砂礫層・泥層などが分布する。崖付近の地下には, 円礫層を変位させる断層が少なくとも6条認められる。地表面が連続するように断層変位を戻しても, 地下では断層を境にシルト岩と礫層が接する。また, 円礫層中に複数の断層による変位・変形が見られるが, 地表面に断層変位は認められない。これらのことから, 過去にもこの地点で断層崖が形成された可能性が高い。

円礫層の堆積時期は, 礫層中の植物片の放射炭素年代測定から約700年前以降に堆積した可能性がある(安江ら, 2025)。また, 礫層を覆う礫まじり泥層(紫色)は, 植物片を多く含む湿地の堆積物であり, 500~300年前にこの場所に湿地を形成するような環境変化があったと考えられる。2024年1月1日の地震の際にこの地点の谷沿いで断層崖の上流側に湿地が形成されていることから, 過去にも類似の現象が発生していた可能性がある。

これらのことから, 過去の断層崖の形成は700年前以降または500~300年前の可能性もある。今後, 綿密な地形・地質調査と年代データの蓄積により, この地域の断層崖の形成と海域活断層の活動との関連を検討していく必要がある。

## 3.8 震源過程と強震観測に基づく高震度生成過程調査

### 3.8.1 強震記録を用いた震源過程調査

強震記録を用いた波形インバージョンにより, 2023年5月5日の地震(M6.5)と2024年1月1日の地震(M7.6)の震源過程を解析した。継続する群発地震活動に関わる伏在断層の浅部延長部が, 2023年5月5日M6.5の地震で破壊した。この地震のすべりの大きな領域は, 地震前に行われた地震波トモグラフ

イ(Matsubara et al., 2022)で $V_p/V_s$ 比の小さな領域に位置していた(Asano and Iwata, 2025)。2024年1月1日のM7.6の地震の破壊は, M6.5の地震のアスペリティの南西端部付近から開始した。はじめに, 珠洲市直下で始まった破壊が能登半島北岸断層沿いに南西向きに伝播し, 遅れて, 海域下での震源断層で北東方向への破壊が始まった。能登半島北岸断層沿いの破壊と能登半島北東端から富山トラフ西縁にかけての海域活断層の破壊が約13秒の時間差で連動したことで, 珠洲市周辺では振幅の大きな地震動が長時間継続したと考えられる。能登半島下の震源断層のすべりは, 能登半島北西端部周辺で特に大きく, 隆起量の大きな地域と対応している。

### 3.8.2 臨時強震観測に基づく珠洲市地震被害地域の強震動特性

2022年6月19日の地震(M5.4)による被害が集中して観察された珠洲市市街地の6ヶ所(うち正院地区4ヶ所)に地震計を設置し, 臨時強震観測を実施した。その結果, 4ヶ所の臨時強震観測点で, 2023年5月5日の地震(M6.5)と2024年1月1日の地震(M7.6)の速度波形記録を得た。設置した地震計は, 震度5弱以上の揺れに対して, 振幅の飽和や周波数帯域に依存した振幅低下が認められたため, 振動台実験の結果に基づいた記録補正を行った結果, 前者の地震では震度6弱~6強, 後者の地震では震度6強に相当する揺れが生じていたことを示した(大堀ら, 2024)。なお, 6ヶ所の臨時強震観測点で同時に波形記録が得られた中小地震の計測震度相当値をK-NET正院(ISK002)の計測震度と比較すると, 地点ごとに系統的な差異が認められるものの概ね対応しており, M6.5の地震およびM7.6の地震の波形記録が得られなかった2ヶ所(うち正院地区)の臨時強震観測点においても, 波形記録が得られた4ヶ所と同様の強い揺れが生じていたとみられる。

### 3.8.3 強震記録に基づく非線形地盤震動特性の調査

2022年6月19日能登地方M5.4の地震で震度6弱を観測したK-NET正院(ISK002)において微動アレイ調査を行い, 浅部地盤により周期1秒の地震動増幅があることを示した(岩田ら, 2022)。ISK002の卓越周期1秒は, 2023年5月5日M6.5の地震でも見られたが, 2024年1月1日の地震(M7.6)では卓越周期が長周期化していることが見られた。そこで, 能登半島各地で得られた本震の強震記録の非線形指標(DNL)(野口・笹谷, 2011)を求めたところ, ISK002を含む建物被害や地盤被害が強震観測点周辺でみられた堆積層上の観測点でDNL値が大きい一方, 丘陵

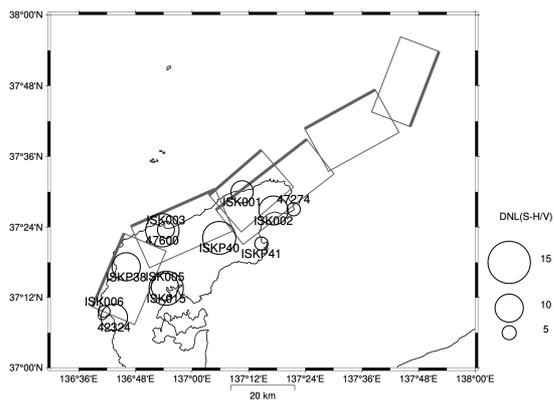


図-1 奥能登地域の強震観測点での本震記録とそれ以前の弱震動記録のS波部分のHVスペクトル比の比較によるDNL値の分布。

地などの被害が比較的少ない観測点ではDNL値は小さかった(図-1)。強震動により表層地盤が非線形応答をし、表層地盤での卓越周期の長周期化が被害増大と関係している可能性がある。

### 3.9 震災による被害状況の調査と再建に関する検討

#### 3.9.1 建物被害

令和6年能登半島地震(M7.6)による建物被害状況の詳細調査として、建物被害全数調査を令和5年奥能登地震と同様な手法により実施した。調査対象地区としては、奥能登地区の被害を代表している、または既往の地震による被害との関連について調査できる9地区(珠洲市正院地区、飯田地区、宝立町鶴飼地区、輪島市河井地区、鳳至地区、門前町走出・館地区、門前町道下地区、門前町黒島地区、穴水町大町地区)を選定した。調査棟数は7,000棟強である。調査の結果、1981年以前建築(旧耐震基準)の建物は9割程度に被害が生じた一方、現行設計基準(2000年以降)建築では3割程度の被害、かつD4以上の被害が5%程度に留まっていることが明らかとなった(荒田ら, 2024)。この割合については2016年熊本地震における建物被害の築年別の傾向と類似している。また、令和5年奥能登地震の影響が建物に残っていること、すなわち建物塑性応答させる程度の繰り返し地震動が建物被害に対し強く影響することが、地区ごとの調査結果から示唆された。さらに、2007年能登半島地震を受けた建物改修の程度が、今回の地震被害に影響していることが明らかとなったため、今後の再建、建物改修についての検討課題となると考えられる。

#### 3.9.2 地盤被害

令和6年能登半島地震(M7.6)による地盤被害状況の調査として、新潟県、富山県、石川県各県について包括的に現地被害調査を行った上で、石川県かほく市、内灘町、新潟県新潟市西区、富山県高岡市、氷見市における液状化被害について詳細調査を実施した。被害様相として、既往の地震による地盤被害と同様な要因で発生していたことを明らかにしたが、特にかほく市、内灘町については最大30m程度の側方流動が発生したことが調査により明らかとなった。一般的に震源域からの距離によって地震の揺れが低減されるが、今回の地震については外力レベルに比して被害の程度が大きいことから、その要因(地震動の継続時間、他)について分析を進めているところである。また、輪島市内のビル倒壊要因には地盤状態が強く影響されているが、現在被害要因について分析を進めているところである。

#### 3.9.3 新潟市域の液状化被害

2024年1月1日に発生した能登半島地震により、新潟市内2025年8月時点で約15,000棟の建物被害が発生した。新潟大学は、新潟市西区と江南区の一部において、卜部厚志・片岡香子・西井稜子・渡部 俊・河島克久・新屋啓文・渡部直喜・松元高峰、清水康博・藤林紀枝・宮縁育夫(熊本大学)の研究グループにより、1月4日から液状化に伴う諸現象(噴砂、家屋損壊、亀裂(地すべり性)など)の悉皆調査を行った。この結果、液状化被害は、①砂丘斜面末端(青山〜内野までの県道16号沿い)、②信濃川の流路跡(山田〜善久、江南区天野)、③低地の宅地造成地(寺尾東等)に集中していることが明らかとなった(図-2)。また、これらの被害分布は、1964年以降に市街化した低地の宅地造成地を除くと、1964年新潟地震での液状化被害分布とほぼ一致しており、再液状化していることが明らかとなった。さらに、①から③の地形・地質・土地履歴の特徴から液状化被害の要因が異なるため、SWS試験とボーリング調査を併用した液状化層の深度、層相、地盤強度分布などの調査を行った(Kataoka et al., 2024; 卜部ら, 2024)。

この結果から、①から③の被災タイプごとの液状化層の特徴を以下にまとめる。

①砂丘斜面末端部(寺尾本村)：砂丘斜面末端部の地表下深度1~2m部分が液状化し、地層内で間隙水圧の上昇にともなる小規模な側方流動が発生した。この小規模な変位に伴い砂丘斜面末端部の宅地表層地盤が下方に移動し、地すべりのような現象が発生した。液状化した砂層は、自然地盤の砂丘砂である。

②信濃川旧流路(善久、ときめき)：信濃川が運搬してきた砂層のうち、表層部の地表下深度1~3m部

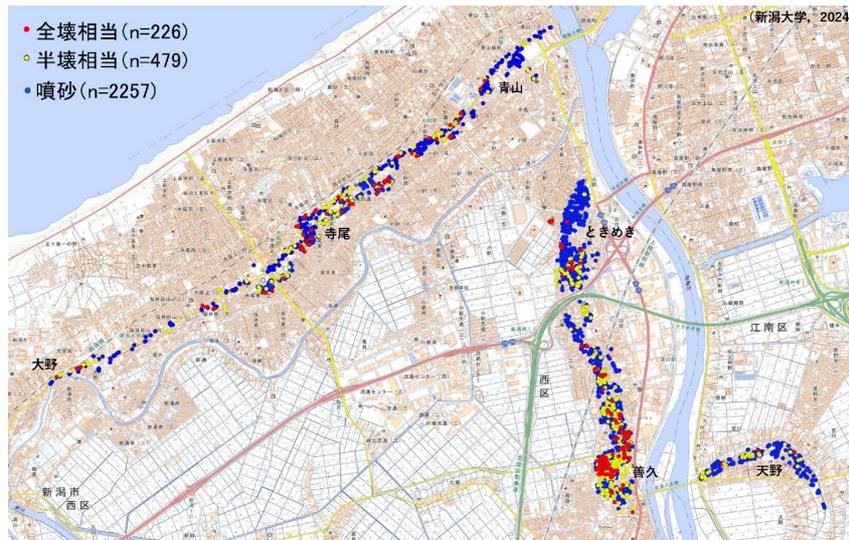


図-2 2024年能登半島地震による新潟市西区および江南区での液状化被害。

分が液状化した。この部分より下位の粗粒砂層は液状化していないものと判断できる。液状化した砂層は信濃川が運搬してきた砂層であり、透水性が高く砂層の連続性は高いと判断できる。一方で、全体として流路内での自然堆積した地層であるため、空間分布における層相の多様性は否定できず、最終的な流路放棄による表層部は細粒な堆積物となっている可能性もあり詳細な検討が必要である。

③低地部（寺尾東）：1964年以降の宅地造成の際に、水田に盛土（砂丘砂）した砂層のうち地下水位以下の地表から深度1～3m部分が液状化している。液状化した砂層は、砂丘起源の砂であることから透水性が高く、盛土した範囲での分布の連続性も高いものと推定できる。

これらの調査成果の概要は、2024年6月に新潟大学の報告書として公開しており、その後の行政による液状化対策の基礎資料として活用されている（新潟大学災害・復興科学研究所，2024）。

### 3.10 社会的脆弱性による災害時の地域への影響調査

#### 3.10.1 被災集落・被災地域の状況調査

令和6年1月に発生した能登半島地震の被害で社会的脆弱性が顕著に表れた点として、①集落の孤立、②生産・流通の障害、が挙げられる。前者に関しては、ヒアリング調査によって集落孤立時の実態およびニーズを明らかにした（林，2024a；青木，2025）。後者に関しては、生産現場の被害状況調査（林，2024b）、流通現場の被害状況調査（青木，2024a）に加え、流通・消費過程を通じた能登半島地震からの

復興支援に関する調査を行った（林，2025）。

#### 3.10.2 防災教育・災害伝承の調査および実践

輪島市教育長へのヒアリング調査を実施するとともに、石川県教育委員会の業務と連動して被災地の学校を訪問し、学校の被災状況に関する調査を実施した。その成果を基に教員・学校現場向けの研修資料を作成し、インターネット上で公開するとともに、(<https://drive.google.com/file/d/1ZlXQyFp6ATAdSPo2stm-V002UfzIHsCE/view>)、学校教員対象の防災研修で使用している。

防災教育・災害伝承を進めるため、能登半島地震によって生じた地形変化や建物被害などを災害遺構として残すことを目的に現地調査を行い、その成果を公表した（青木，2024b）。この成果は、石川県観光戦略課の復興施策に取り入れられ、修学旅行誘致のプログラムとして実装されている（<https://www.hot-ishikawa.jp/asset/kyouikuryokou/kyouikuryokou06.pdf>）。さらに、地形変化については兵庫教育大を中心とするグループとともに、能登半島地震に伴う海岸隆起やマスマーブメントによって生じた地形をドローンによって計測し、3Dデータ化するとともに教材開発を行い、学校教員や児童を対象とした教育実践を行った（Ogura et al., 2025）。

#### 3.10.3 被災地における調査公害に関する分析

能登半島地震後に実施された社会科学系の各種学術団体・組織による調査の状況と、その「合成の誤謬」に関する調査分析を行った（Hara et al., 2025）。

多くの研究活動が相互調整が行われない状況で実施された結果、現地に負荷をかけていた実態が示された。災害時の社会科学的調査における調整機能の実装が必要であることを主張している。

### 3.10.4 被災者の生活不安・健康不安要因の分析

#### 3.10.4.1 避難所の課題

2024年1月1日の地震ではライフラインの途絶に加え、住民に加えて正月休みで帰省していた家族が避難所に殺到し、初日から食糧、水など備蓄品の圧倒的不足に陥る事態となり、時間の経過とともに体調悪化、健康不安を口にする避難者が増加した。奥能登地域では震災前から高齢化率が高く、激甚災害が発生すれば医療・福祉・介護ニーズがある避難者の増加は明白であった。それゆえ、奥能登のように高齢化率の高い地域では、スロープや段ボールベッド、冷暖房のための電源の確保など、避難所として指定されたすべての施設が福祉避難所としての最低限の機能を有する必要がある。

#### 3.10.4.2 仮設住宅の居住空間の狭さ

仮設住宅入居者に占める高齢者の割合は高いが、室内は高齢者や障がい者が安心して生活を送れるもの、すなわち入居者の特性に合ったものになっていない。例えば、台所と風呂場・トイレとの間の段差に躓き転倒する、玄関外の通路部分は水が溜まりやすい材質であり、足腰の悪い高齢者が足を滑らせやすい等の事例がある。また、居住空間の狭さがストレスになっているケースもある。輪島市では公共用地の不足等から、一部の夫婦世帯に四畳半の1Kタイプが割り当てられ、介護用ベッドが必要な夫のため、妻は手狭なスペースで寝起きをするしかなく、メンタル、フィジカル両面での疲弊をもたらしている。

したがって、入居期間中に健康を害することや、室内で転倒して怪我をするリスクを排除した仕様の住居の供給が必要である。供給された住宅に被災者が合わせるのではなく、どのような住民が居住するかを重視した供給でなければならない。

#### 3.10.4.3 仮設住宅の居住配置について

1995年の阪神・淡路大震災時の仮設住宅等における孤独死の多発経験を踏まえれば、仮設住宅は、基本的に元の地区・集落の人々ができるだけまとまった形で入居できるようにすることが望ましい。2007年能登半島地震当時、既に過去の経験を反映し、地区・集落ごとの入居に取り組んでいた仮設住宅もあった（輪島市門前町道下仮設等）。

しかし、2024年能登半島地震被災地の仮設住宅運営では、地区・集落ごとの入居に配慮した仮設住宅が一定数見られる一方、かなり規模の大きな仮設住宅においても同一地区の住民がバラバラに入居しているケースが見受けられる。こうした所では、避難所から仮設住宅に移る段階において、仮設住宅に生活の場を移すことを躊躇する住民の様子も散見された。仮設住宅における住民の不安や孤立、健康状態悪化、孤独死等を防ぎ、また地域コミュニティを維持して復旧および復興のまちづくりへの住民参加を保障するためにも、仮設住宅の居住配置のあり方についてはなお改善が求められる。

#### 3.10.4.4 集会機能の拡充

仮設団地の約3割は集会所や談話室が設置されていない。災害救助法では20戸未満の仮設団地には設置しなくてもよいことになっているが、奥能登のように平地や公共用地が少なく、まとまった用地の確保が難しい場合、結果的に戸数の少ない仮設団地にならざるを得ない現状がある。被災者同士の交流の重要性が指摘されているが、住民が集う機能を有する場がなければ、集まることさえ難しく孤立しやすくなる。戸数で集会所・談話室を制限するのではなく、すべての仮設団地に集会所・談話室的機能を持った空間を設置する必要がある。

#### 3.10.4.5 住民自治のための継続的サポートの必要性

2007年能登半島地震当時は、輪島市門前町道下地区で、前年の避難訓練の実施や民生委員等を中心とした「要援護者マップ」の取り組み等によって、迅速な安否確認ができ、マスコミなどで高く評価された。しかし、同地区総区長への聞き取りによれば、2024年能登半島地震時には、当時のような安否確認システムは十分に機能しなかったという。背景には、被害の甚大さもあるが、2007年以降一層進んだ高齢化や地域内自治組織の衰退があると考えられる。

地域全体の高齢化や自治組織の担い手の疲弊は、現在、復旧および復興活動やまちづくりの担い手の層の薄さにも現れている。2024年度中には各市町でも復興計画が策定され、自宅再建のあり方や、災害公営住宅の建設場所等、議論が必要な事項がこれから多く生じることとなるが、住民の自己決定を保障した住民自治のまちづくりのために継続的なサポートが必要である。

#### 3.10.4.6 将来の見通しが立たないことへの不安

仮設住宅入居者を対象とした生活実態調査の結果

から、時間の経過に伴い幾重もの不安が重なる現状にあることが明らかとなった。中でも多いのが物価高騰、災害公営住宅に関する不安である。①物価高騰：光熱費等の高騰による負担増や資機材や人件費の高騰により、当初と比べ住宅再建に係る費用が重くのかかる結果、住宅再建を諦め災害公営住宅への入居などを検討する住民が出ている。②災害公営住宅への入居：供給戸数、完成時期、入居基準、さらには災害公営住宅入居した後数年後の家賃負担など、仮設住宅を退去した後の生活に不安を募らせている。公費解体が進み、更地が増える一方で、その更地にどのように住宅が建ち、まちが再生し、個々の世帯の生活再建が進むのか、住民の多くが将来への見通しを持っていないままにいる。

どこで、誰と、どのように暮らすかの見通しが不安定なままであることは被災者にとって肉体的、精神的に大きなストレスである。被災地の人口減少が加速している中、先の暮らしに不安を抱きながらも「ここで暮らし続けたい」という希望を抱く住民が、当該地での暮らしを断念するようなことがあれば、転出はさらに加速する。住み続けることを求める住民が、生活再建の見通しを掴むために、既存の施策の迅速な実施、生活不安を抱える住民を取りこぼさないアウトリーチの強化および再建を諦めさせないための制度のさらなる拡充が求められる。

### 3.11 津波の生成・伝播・遡上特性の解明と断層破壊過程の推定

令和6年能登半島地震による津波高や浸水被害を把握するため現地調査を行い、約70kmにわたる沿岸で計91点の津波痕跡を観測した（有田ら、2024a）。能登半島の東岸北部では最大5.6mの津波高や著しい浸水被害が確認され、南部では津波高は比較的低かった。浸水範囲と被害の程度はL2想定津波に比べて小さく、地形や海岸防護施設の状況と密接に関連していた。並行して、能登半島西部の令和6年能登半島地震に伴う津波の特性や地盤隆起が津波遡上、港湾、海浜に与えた影響について検討した（有田ら、2024b）。津波痕跡高の最大値は志賀町赤崎地区の4.2m、浸水範囲や津波被害は局所的であり、主に港湾区域内や護岸直背後に限定された。地盤隆起の影響は志賀町西海風戸地区以北で顕著であり、輪島市鹿磯漁港や黒島漁港において、地盤が3.5～4.0m程度上昇していたことが確認された。加えて、石川県輪島市舳倉島を対象に、津波による浸水範囲および痕跡高分布に関する詳細な現地調査を行った（二木ら、2024; Futagi et al., 2025）。現地測量結果からは、島内の異なる地域において津波痕跡高に著しい変動が確認され、漁港防波堤背後では、防波堤外と比較して、

浸水高・遡上高が40～50%低減されたことが確認された。最大津波痕跡高は、北部地域で観測され、その値は6.5mと石川県内で最大であった。合わせて、非線形長波理論に基づく数値シミュレーションを実施し、津波の伝播および浸水プロセスの特徴を明らかにした。

これらの調査・解析に加えて、珠洲市春日野・鶴飼地区、飯田地区、寺家地区の3地域を対象に、建物被害調査と浸水深調査を実施し、GIS上で統合分析を行って、定量的・定性的な評価・分析を行った（郷右近ら、2024）。建物被害評価では、現地調査や空撮画像の判読により流失・倒壊の空間分布を、浸水深調査では、津波浸水深の空間分布を明らかにした。また、津波浸水深が170cmに到達した時点で10%、258cmに到達した時点で80%の建物が流失する傾向が明らかになった。

上記の結果に加えて、日本海沿岸で観測された津波到達時刻から逆算した津波波源域の長さは約100kmで、能登半島東北東方向沖合に及ぶことを推定した（気象庁、2024）。また、近傍に津波波源の存在の可能性が示唆された富山湾沿岸を対象とした津波の現地調査結果をまとめた（南ら、2025）。さらに、高岡市雨晴海岸と富山市岩瀬浜のライブカメラ映像を解析し、日没までの津波時系列データを抽出した（南ら、2024）。

### 3.12 地域経済への影響と復興過程の調査

人口減少、高齢化、被災地域の立地条件などが影響し、地震による地域経済への影響はこれまでの災害とは異なる様相を示している。2024年度に14件の被災事業者と支援機関へのヒアリング調査（鶴島ら、2024）を実施した結果、道路・水道をはじめとするライフライン復旧の長期化や公費解体の遅れ、人口減少に伴う将来の収益性への不安、事業承継の問題などが足かせとなり、従来の災害比較して復旧が遅れている様子が見えかけた。観光や復旧拠点となる宿泊事業者の被害の影響も大きく、地域のその他産業の需要減少にもつながっている。一方、被災企業の中でも、ボランティアの宿泊受け入れや家屋の修繕などに貢献しているケースもあり、行政、商工会議所、地元金融機関などのサポート機関では、DXの推進や支援制度の改良を通じてより一層の復旧・復興支援が進められていた。

さらに、ヒアリング結果を念頭に2025年1月から2月にかけて奥能登地域の事業者を対象としたアンケート調査を実施した。1071件の事業者からの回答を得ており、現時点では単純集計を行った段階での報告になる。図-3は、事業所の売上回復状況を示し

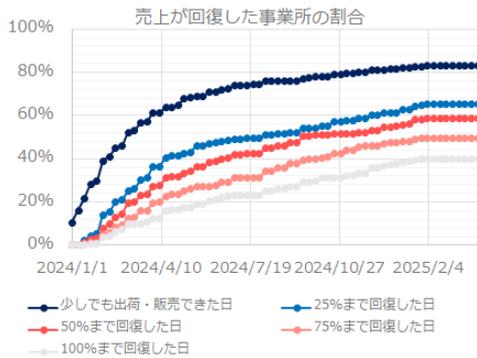


図-3 事業所の売上の回復状況（震災前を100%に設定）。

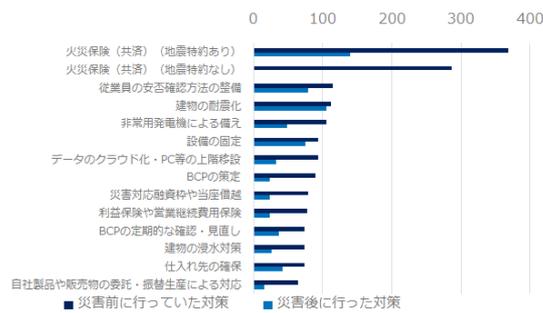


図-4 能登半島地震発生前後の事業所の災害対策実施状況。

たものである。2025年2月時点で約8割の事業者が営業を再開している（少しでも出荷・販売できた）が、震災前の売上に回復した事業者はその半分の4割程度である。被災地の事業所が1年以上の長期にわたり、震災の影響を受け続けていることが見てとれる。

図-4は、事業者が震災前に実施していた災害対策と災害後に実施した対策を数え上げたものである。共済を含めた地震特約有の火災保険の加入件数が最も多く、震災後に加入した事業者も多く存在する。地震災害への備えの重要性を強く認識した事業者が増えており、輪島市の地震火災も影響を及ぼしている可能性がある。また、建物の耐震化や設備の固定など、わずか震災後1年程度の期間内に災害対策が事後的に進展していることが分かる。

#### 4. 研究成果の発信

本総合調査における現地での調査観測や研究成果に関しては報道機関等を通じて一般市民へ継続的に発信された。2025年7月27日には珠洲市で一般市民向けに、本総合調査の成果報告シンポジウム「令和の能登半島地震を知り、地震や津波に強いコミュニティを考える」を開催した。また、研究代表者と地元自

治体（珠洲市、能登町、穴水町）、石川県、金沢地方気象台との意見交換会を複数回実施し、石川県防災会議震災対策部会でも総合調査の調査内容や研究成果に関して情報共有を行なった。本総合調査の成果は、日本地球惑星科学連合大会やその他の学協会での令和6年能登半島地震に関するセッションで多くの発表がなされた。また、Earth, Planets and Space誌でのSpecial Issue “The 2024 M7.6 Noto Peninsula Earthquake and Seismic Swarm” やその他の学術雑誌に多くの研究成果が学術論文として発表され、研究代表者や分担者による一般向けの解説や報告も多数行われた。

#### 5. おわりに

本総合調査では、12のテーマを設け、令和6年能登半島地震に関する調査研究を実施し、能登半島北東部で継続していた地震活動・地殻変動と関連した現象として、2024年1月1日のM7.6の地震の発生メカニズムとその震災・津波被害や復旧・復興過程に関する研究成果について報告を行った。本総合調査で得られたデータの分析は現在も継続されており、今後も地震調査研究の推進や地震防災対策に資する新たな成果の発表が期待される。

#### 謝辞

本研究は科学研究費（特別研究促進費）「2023年5月5日の地震を含む能登半島北東部陸海域で継続する地震と災害の総合調査」（23K17482）の助成を受けて実施しました。本研究の実施にあたり、文部科学省研究開発局地震・防災研究課、同省学術振興局学術研究助成課、東京大学地震研究所地震・火山噴火予知研究協議会企画部、京都大学防災研究所自然災害研究協議会、被災地の自治体や住民、関係機関等の方々の協力を頂きました。記して感謝します。

#### 参考文献

Akuhara, T., Shinohara, M., Yamada, T., Azuma, R., Hino, R., Obana, K., Takahashi, T., Fujie, G., Kodaira, S., Murai, Y., Baba, H., Yamashita, Y., Yakiwara, H. (2025): Non-double-couple components of the 2024 Noto Earthquake aftershocks: Influence on focal mechanism estimation, Earth Planets Space, in press.

Amezawa, Y., Hiramatsu, Y., Miyakawa, A., Imanishi, K., Otsubo, M. (2023): Long-Living Earthquake Swarm and Intermittent Seismicity in the Northeastern Tip of the Noto Peninsula, Japan, Geophys. Res. Lett., 50,

- e2022GL102670,  
<https://doi.org/10.1029/2022GL102670>.
- 青木賢人 (2024a): 令和6年能登半島地震とショッ  
ピングセンター～被害とこれから～, SC  
JapanToday, 571, 22-24.
- 青木賢人 (2024b): 震災遺構の保全と利用, 地理,  
831, 134-138.
- 青木賢人 (2025): 能登半島地震と奥能登豪雨にみる  
「避難」の諸相. 日本地理学会発表要旨集, 107, 26.
- 荒田祥司・大谷未歩・村田晶 (2024): 令和6年能登  
半島地震被災地域における建物被害悉皆調査につ  
いて, 自然災害科学, 43, 3, 537-549,  
[https://doi.org/10.24762/jndsj.43.3\\_537](https://doi.org/10.24762/jndsj.43.3_537)
- 有田守・榎田真也・二宮順一・郷右近英臣・熊谷健  
蔵・越村俊一・由比政年 (2024a): 令和6年能登半  
島地震津波による能登半島東岸域の津波浸水・被  
害調査, 土木学会論文集, 80(17), 24-17087,  
<https://doi.org/10.2208/jscej.24-17087>.
- 有田守・榎田真也・二宮順一・森信人・由比政年  
(2024b): 令和6年能登半島地震による津波・地盤隆  
起が能登半島西岸に及ぼした影響に関する現地調  
査, 土木学会論文集, 80(17), 24-17096,  
<https://doi.org/10.2208/jscej.24-17096>.
- Asano, K., Iwata, T. (2025): Source Rupture Process of  
the MW 6.2 Earthquake in the Noto Peninsula, central  
Japan, on May 5, 2023, *Earth Planets Space*, 77, 54,  
<https://doi.org/10.1186/s40623-025-02186-w>.
- Futagi, K., Yuhi, M., Arita, M., Umeda, S., Ninomiya, J.,  
Baba, T., Suzuki, Y., and Haraguchi, T. (2025): Post-  
Event Survey and Numerical Simulation of the  
Tsunami Inundation Caused by the 2024 Noto  
Peninsula Earthquake in Hegurajima Island, Japan,  
*Coastal Engineering Journal*, 67, 1-25,  
<https://doi.org/10.1080/21664250.2025.2545691>.
- 二木敬右・由比政年・榎田真也 (2024): 石川県輪島  
市舳倉島における令和6年能登半島地震による浸  
水域および被害調査, 土木学会論文集, 80(17), 24-  
17095, <https://doi.org/10.2208/jscej.24-17095>.
- 後藤玲奈, 立石 良・宍倉正展・レグット佳  
(2025): 海食地形調査に基づく能登半島北東部の地  
震活動の推定, 日本地球惑星科学連合2025年大会,  
SSS14-P03.
- 郷右近英臣・大平尚輝・高橋康朗・中野森平・福田  
勝仁・有田守・榎田真也・二宮順一・越村俊一  
(2024): 令和6年能登半島地震津波による珠洲市の建  
物被害と浸水深の関係性評価, 土木学会論文集,  
80(17), 24-17090, <https://doi.org/10.2208/jscej.24-17090>.
- Hara, Y., Takeda, K., Yamashita, R., Saito, R., Sasaki,  
D., Hayashi, K., Aoki, T. (2025): The “fallacy of  
composition” as an ethical challenge facing scientific  
research in disaster-affected areas: The 2024 Noto  
Peninsula Earthquake and Tsunami, *International  
Journal of Disaster Risk Reduction*, 119,  
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2025.105359>.
- 林 紀代美 (2024a): 地震発生から二次避難まで一珠  
洲市高屋町の事例, 地理, 831, 118-131.
- 林 紀代美 (2024b): 令和6年能登半島地震の水産業  
への影響, 831, 99-105.
- 林 紀代美 (2025): 食を通じた復興支援への消費者  
の関わり — 長野県民による「ビタミンちくわ」  
購入を事例として —, 金沢大学人間科学系紀要, 17,  
41-65.
- 平松良浩・他23名 (2023): 能登半島北東部において  
継続する地震活動に関する総合調査, 自然災害科  
学総合シンポジウム講演論文集, 60, 12-17,  
<http://hdl.handle.net/2433/285957>.
- 平松良浩・他67名 (2024): 2023年5月5日の地震を含む  
能登半島北東部陸海域で継続する地震と災害の総  
合調査その1, 自然災害科学総合シンポジウム講  
演論文集, 61, 1-16, <http://hdl.handle.net/2433/290615>.
- 井上卓彦・岡村行信 (2010): 能登半島北部周辺20万分  
の1海域地質図及び説明書, 海陸シームレス地質情  
報集「能登半島北部沿岸域」数値地質図S-1.
- 岩田知孝・浅野公之・宮本 英・緒方夢頭 (2022): 2022  
年6月能登地方の地震によるK-NET正院 (ISK002)  
の地震動特性と地盤構造, 日本地震学会2022年秋  
季大会, S16-04.
- Kataoka, K., Urabe, A., Nishihi, R., Matsumoto, T.,  
Niiya, H., Watanabe, N., Kawashima, K., Watabe, S.,  
Takashimizu, Y., Fujibayashi, N., Miyabuchi, Y.  
(2024): Extensive liquefaction and building damage on  
the Niigata Plain due to the 1 January 2024 Noto  
Peninsula Earthquake: Geomorphological and  
geological aspects and land-use in coastal and lowland  
areas. EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria,  
14-19 Apr 2024, EGU24-22541,  
<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-22541>.
- Kinoshita, Y. (2025): InSAR-based observations of the  
2020-2021 transient deformation and the 2023  
earthquake in Noto Peninsula, Japan. *Earth Planets  
Space*, 77, 139, <https://doi.org/10.1186/s40623-025-02265-y>.
- 気象庁(2024): 災害時地震・津波報告 令和6年能登半  
島地震, pp.10.  
[https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaij  
i\\_2024/saigaiji\\_202403.pdf](https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/saigaiji/saigaij_i_2024/saigaiji_202403.pdf)
- Matsubara, M., Ishiyama, T., No, T., Uehira, K.,

- Mochizuki, M., Kanazawa, T., Takahashi, N., Kamiya, S. (2022): Seismic velocity structure along the Sea of Japan with large events derived from seismic tomography for whole Japanese Islands including reflection survey data and NIED MOWLAS Hi-net and S-net data, *Earth Planets Space*, 74, 171, <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01724-0>.
- Matsumoto, R., Yoshida, K. (2024): Quasi-real-time earthquake relocation and monitoring in the northeastern Noto Peninsula, *Earth, Planets and Space* volume 76, 131, <https://doi.org/10.1186/s40623-024-02079-4>.
- 松本 聡・江本 賢太郎・太佐 駿吾・酒井 慎一・堀内茂木 (2024): 稠密地震観測による2024年能登半島地震 前の発震機構の特徴と地震前応力場, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SCG55-14.
- 南雅晃・対馬弘晃・林豊(2024): ライブカメラ映像から抽出した2024年能登半島地震の津波時系列データ. 土木学会論文集 80(17), 24-17075, <https://doi.org/10.2208/jscej.24-17075>
- 南雅晃・対馬弘晃・林豊・中田健嗣(2025): 2024年能登半島地震に伴う津波の現地調査報告, 気象研究所技術報告 88, <https://doi.org/10.11483/mritechrepo.87>
- 内閣府 (2025): 令和6年能登半島地震による被害状況等について (令和7年8月5日16:00現在). ([https://www.bousai.go.jp/updates/r60101notojishin/r60101notojishin/pdf/r60101notojishin\\_58.pdf](https://www.bousai.go.jp/updates/r60101notojishin/r60101notojishin/pdf/r60101notojishin_58.pdf)) 2025年8月31日閲覧
- 新潟大学災害・復興科学研究所 (2024) 2024年能登半島地震による新潟市域の液状化被害. 新潟大学災害・復興科学研究所, 39p, <https://drive.google.com/file/d/1LQMJg8FLDH7iDS55aV4v6Nb3lvDa-1Ws/view>.
- Nishimura, T., Hiramatsu, Y., Ohta, Y. (2023): Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan, *Sci. Rep.*, 13, 8381, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35459-z>.
- 野口科子・笹谷 努 (2011): 2003年宮城県沖スラブ内地震における表層地盤の非線形応答とその強震動への影響, 地震第2輯, 63, 165-187.
- Ogura, T., Yamauchi, H., Aoki, T., Matta, N., Iizuka, K., Iwasa, Y., Takahashi, T., Hayashi, K., Hattanji, T., Oguchi, T. (2025): High-definition topographic archiving and educational applications in regions affected by the 2024 Noto Peninsula Earthquake. *J. Disas. Res.*, 20, 401-409. <https://doi.org/10.20965/jdr.2025.p0401>
- 大堀道広・鈴木晴彦・岩田知孝・浅野公之・飛田 潤・石塚 理・村田 晶 (2024): 被災地域の地盤特性と地震動の特徴, 第52回地盤震動シンポジウム論文集, 31-39.
- Ohtate M., Y. Ohta, Y. Mitsui (2025): Significant afterslip contribution to postseismic deformation on Sado Island following the 2024 Noto Peninsula Earthquake: Insights from two dense GNSS observation networks, *Earth Planets Space*, 77, 74, <https://doi.org/10.1186/s40623-025-02203-y>.
- 岡田知己・2024年能登半島地震陸域余震観測グループ (2024): 令和6年能登半島地震について(序報)(4)能登半島北東部の地震波速度構造と震源分布との関係, 地震予知連絡会会報, 112, 693-696. [https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou112/11\\_11.pdf](https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/report/kaihou112/11_11.pdf)
- Paris, N.・伊東優治・Brenquier, F.・Wang, Q.-Y.・Higueret, Q.・盛 一笑・高木涼太・内田直希・岡田知己・平原 聡・木村洲徳・酒井慎一 (2024): 2024年能登半島地震(Mw 7.5)に伴う地震時地震波速度変化, 2024年度日本地震学会秋季大会, S22-06.
- Shinohara, M., Hino, R., Takahashi, T., Obana, K., Kodaira, S., Azuma, R., Yamada, T., Akuhara, T., Yamashita, Y., Kurashimo, E., Murai, Y., Isse, T., Nakahigashi, K., Baba, H., Ohta, Y., Ito, Y., Yakiwara, H., Nakatani, Y., Fujie, G., Sato, T., Shiobara, H., Mochizuki, M., Sakai, S., Hakuho-maru KH-24-JE01 and KH-24-JE02C shipboard science parties (2025): Precise aftershock activity in marine source region of 2024 Noto-Hanto earthquake by rapid response observation using ocean bottom seismometer, *Earth, Planets Space*, 77, 43, doi:10.1186/s40623-025-02171-3.
- 宍倉正展・越後智雄・行谷佑一 (2020): 能登半島北部沿岸の低位段丘および離水生物遺骸群集の高度分布からみた海域活断層の活動性, 活断層研究, no.53, 33-49.
- Tanaka, Y., Nishiyama, R., Araya, A., Sakaue, H., Nakakoji, K., Takata, T., Nishimura, T., Hiramatsu, Y., Sawada, A. (2025): A possibility of fluid migration due to the 2023 M6.5 Noto Peninsula earthquake suggested from precise gravity measurements. *Earth, Planets Space* 77, 32, <https://doi.org/10.1186/s40623-025-02153-5>.
- 立石 良 (2025): 令和6年能登半島地震に伴う海岸隆起と海底変状, 活断層研究, no.62, 21-24.
- 高木涼太・吉田圭佑・岡田知己 (2024): 詳細な3次元S波速度構造に基づく先行した群発地震と2024年Mw7.5 能登半島地震の関係, 日本地球惑星科学連合2024年大会, U15-P13.
- 鶴島大樹・廣野洋太・松島格也・多々納裕一・梶谷

- 義雄・清水 智・齋藤 龍 (2024): 2024年能登半島地震における事業所の被害実態-ヒアリング調査結果より-, 土木計画学研究・講演集, 70, 6p.
- Umeda, K., Yamazaki, Y., Sumino, H. (2024): Geochemical Signature of Deep Fluids Triggering Earthquake Swarm in the Noto Peninsula, Central Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 51, e2024GL108581, <https://doi.org/10.1029/2024GL108581>.
- 卜部厚志・片岡香子・河島克久・西井稜子・松元高峰・渡部直喜・新屋啓文・渡部 俊・高清水康博・藤林紀枝・宮縁育夫 (2024): 2024年能登半島地震による新潟市域での液状化被害日本地球惑星科学連合大会2024年大会, U15-P108.
- Yamada T., Ohta Y., Nishimura T., Yoshida K., Hiramatsu Y., Kinoshita Y. (2025): Coseismic slip distribution of the 2024 Noto Peninsula earthquake deduced from dense global navigation satellite system network and interferometric synthetic aperture radar data: effect of assumed dip angle. *Earth Planets Space* 77, 19, <https://doi.org/10.1186/s40623-025-02154-4>.
- 安江健一・平松良浩・小川智史・山崎伶士・廣瀬健大朗・三浦知督・白濱吉起・杉戸信彦・向吉秀樹・藤田奈津子・永田秀尚・立石 良・道家涼介・小倉拓郎・打木弘一 (2025): 珠洲市若山川沿いに生じた断層の掘削調査と周辺の露頭観察, 日本地球惑星科学連合2025年大会, SSS14-P07.
- Yanagisawa, H., Abe, I., Baba, T. (2024): What was the source of the nonseismic tsunami that occurred in Toyama Bay during the 2024 Noto Peninsula earthquake, *Scientific Reports*, 14, 18245, <https://doi.org/10.1038/s41598-024-69097-w>.
- Yoshida, K., Takagi, R., Fukushima, Y., Ando, R., Ohta, Y., Hiramatsu, Y. (2024): Role of a Hidden Fault in the Early Process of the 2024 Mw7.5 Noto Peninsula Earthquake, *Seismol. Res. Lett.*, 51, 16, <https://doi.org/10.1029/2024GL110993>.
- Yuhi, M., Umeda, S., Arita, M., Ninomiya, J., Gokon, H., Arikawa, T., Baba, T., Imamura, F., Kawai, A., Kumagai, K., Kure, S., Miyashita, T., Suppasri, A., Nobuoka, H., Shibayama, T., Koshimura, S., and Mori, N. (2024): Post-event survey of the 2024 Noto Peninsula earthquake tsunami in Japan, *Coastal Engineering Journal*, 66(3), 405-418, <https://doi.org/10.1080/21664250.2024.2368955>.
- Yuhi, M., Umeda, S., Arita, M., Ninomiya, J., Gokon, H., Arikawa, T., Baba, T., Imamura, F., Kumagai, K., Kure, S., Miyashita, T., Suppasri, A., Kawai, A., Nobuoka, H., Shibayama, T., Koshimura, S., and Mori, N. (2024): Dataset of Post-Event Survey of the 2024 Noto Peninsula Earthquake Tsunami in Japan, *Scientific Data*, 11, 786, <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03619-z>.

# 防災DX時代における行政の意思決定を支援するための 新たな情報可視化アプローチの開発と実践

五十嵐善哉\*・内村太郎\*\*・長田昌彦\*\*・Goit Chandra Shekhar\*\*・齊藤正人\*\*・  
田中規夫\*\*・谷山 尚\*\*・堤田成政\*\*・党 紀\*\*

\* 埼玉大学大学院理工学研究科

\*\* 埼玉大学研究機構社会変革研究センター・レジリエント社会研究部門

## 要 旨

地方自治体では地理空間情報の整備やビッグデータ等を含めた先端技術を積極的に活用した防災DXの取組が進められている。しかし収集された情報は十分に可視化されておらず意思決定に活用しきれていないため、減災が効果的に進んでいない現状にある。本研究は、行政の意思決定を支援する情報可視化アプローチを創出し、地震・気象・水害・地盤災害を対象に「情報・デジタル」と融合させることで、DXを高度に活用した地域防災の強化を目指す。本稿では本研究におけるこれまでの成果について報告する。

## 1. はじめに

都道府県や市町村等の地方自治体の地域防災では、災害の発生のおそれや拡大を防止するために、災害に関する情報の収集及び伝達に努めなければならないことが、災害対策基本法に定められている。そのため、近年の地域防災計画には地理空間情報の整備やAI、ビッグデータ、宇宙技術等の活用などが盛り込まれるとともに、災害オペレーションシステム等に産学発の先端技術を積極的に利活用するなど、具体的な計画や実装が進められている。

一方で、防災DXが進みつつある社会において未だ減災が効果的に進んでいない理由の一つとして、災害時に行政の防災担当者がタイムリーかつ適切な意思決定を行うことが十分にできていないことが挙げられる。その原因は、行政が収集する膨大な情報が災害現象を収集しただけの未処理情報が大半であることに起因する。意思決定の判断材料となる、伝わる情報へ変換されておらず、それらが可視化されていないことが主な要因と考えられる。

本研究は、警戒状態から発災以後の行政の意思決定プロセスにおける災害情報の不足や情報集約・分析の不十分さなどの課題を対象に、単に収集された災害の未処理情報から、意思決定の判断材料となる、新たな情報可視化アプローチを創出し、それを地域

防災の強化に活用することを目的とする。本研究では、地震、気象、水害、地盤災害を対象に、それらを「情報・デジタル」と融合・発展させ、「DXを高度に活用した災害対応」を社会実装につなげる。具体的には以下の検討を行う。

情報統合分野として、光学衛星とSAR衛星データの統合によるセンシングデータフュージョン技術を開発し、災害発生時の迅速な被害把握を目指す。このアプローチにより、災害現場の状況をより正確に把握し、迅速な水害検知を実現する。地震分野では、SNS情報から地震被害の高精度かつ迅速な推定を行うことを目標に、デジタルツイン空間を構築し被害状況の分析技術を開発する。水害分野では、降雨段階別の浸水要因表示による避難支援と流域治水対策のリスクコミュニケーションツールを開発し、浸水リスクの早期警告と対策の効果的な伝達を目指す。全流域の湿潤状況・低水流量モデルと降雨流出氾濫解析モデルの連携手法を構築する。気象分野では、微地形と気象レーダデータを統合したリアルタイム浸水深推定技術の開発により、気象条件に応じた迅速な浸水予測と対策の提案を可能にする浸水予測システムのプロトタイプを作成する。地盤分野では、斜面の降雨時や地震時の挙動を、独自の野外モニタリングの技術により常時監視し、地震時応答を含めて、その災害特性を推定する手法を開発する。また、

リスクコミュニケーション分野として、外国人を対象とした防災・災害情報の伝達に関する現状について調査を行い、地方自治体が推進する多様性を配慮した防災DXの課題を評価する。

本稿では、各分野におけるこれまでの研究成果の概要を報告する。

## 2. 衛星リモートセンシングデータフュージョン技術の開発

### 2.1 本節の研究背景と目的

衛星リモートセンシング技術は広範囲の観測が可能であり、洪水による浸水域のモニタリングに適している。現在、Sentinel-1による合成開口レーダ(SAR)およびSentinel-2によるマルチスペクトル画像(MSI)が無償で提供されているが、これらの観測頻度は5~12日程度と限られており、災害時にどのセンサーで観測されるかは予測困難である。そこで本研究では、災害時や発生直後に即時利用可能なマルチスペクトルおよびSARデータを用いて、洪水浸水域を迅速かつ高精度に推定する手法を開発した。

本研究では、リモートセンシングデータ向けに開発された事前学習モデルPre-trained Remote Sensing Transformer (Presto)を基盤とした。Prestoは複数種類のリモートセンシングデータ(Sentinel-1, Sentinel-2, SRTM DEM, ERA5, Dynamic World)を扱うことができ、ピクセルレベルでの処理を行う。提案手法では、洪水データセットSen1Floods11を用いてPrestoモデルを洪水浸水域推定タスク向けにファインチューニングした。データセットは訓練用50画像、検証用20画像、テスト用36画像に分割し、Sentinel-1の2バンド、Sentinel-2の10バンド、およびNDVIを含む計13バンドのデータを使用した。

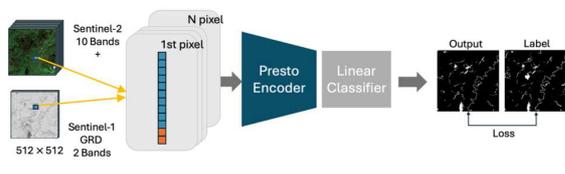


図-1 提案モデルアーキテクチャの概要

### 2.2 結果と考察

実験では現実的な3つのケースを想定した：

- ケース1：MS+SAR（両方のセンサーデータが利用可能）
- ケース2：MS（マルチスペクトルデータのみ利用可能）
- ケース3：SAR（合成開口レーダデータのみ利用可能）

ファインチューニング時のデータに含まれていないボリビアの洪水データを用いたテスト結果において、以下の性能を達成した：

ケース1：mIoU 0.886, F1スコア 0.896

ケース2：mIoU 0.884, F1スコア 0.893

ケース3：mIoU 0.736, F1スコア 0.718

ケース1およびケース2では先行研究(Prithviモデル：F1スコア 0.876)と比較して同等かそれ以上の精度を示した。一方、ケース3では他のケースと比較して精度の低下が見られた。

### 2.3 本節の結論と今後の展開

本研究では、単一のモデルで複数の観測条件に対応可能な洪水浸水域推定システムを構築した。マルチスペクトルデータが利用可能な場合(ケース1, 2)については先行研究を上回る高精度な推定を実現した。主要な課題として、SARデータのみが利用可能な場合の精度向上が挙げられる。これは、SARデータに固有のスペックルノイズや都市部での複雑な反射パターンが影響していると考えられる。今後の研究では、SAR専用のモデルアーキテクチャの再設計や、ノイズ除去技術の統合に焦点を当て、より堅牢な災害対応システムの構築を目指す。

## 3. 3次元都市モデルとSNS等の2次元画像を活用した被災位置の特定手法の開発

### 3.1 本節の研究背景と目的

近年、SNS等のビッグデータを活用した地震被害や水害情報の収集分析システムに関して、多数の自治体において導入や実証実験などが進められている。一般にこうしたSNS等を利用した技術が提供する情報は撮影画像と緯度経度情報であり、後者は限定的なEXIF情報や推定手続きにより得られる。これらの情報には画像の方位角情報が不足していることから、被災位置を特定することは難しい。また、画像の方位角がすべて取得できたとしても、被災地点が画像中央に位置している保証はないことから、緯度経度と方位角情報のみでは被災位置推定の良好な精度は期待できない。地震火災のリアルタイム延焼予測など災害応急対策で活用するためには、精度の高い被災位置の特定が不可欠である。

そこで本研究は、災害事例として火災状況を拡張現実(AR)により構築し、撮影画像の方位角を既往の特徴点抽出手法と深層学習に基づく手法とを適用し推定及び検証する。また、3次元都市モデル(国土交通省PLATEAU)の3次元情報空間を利用し、2次元画像から被災(火災)位置をピンポイントで特定する手法を提案する。

### 3.2 方位角推定手法の従来法の適用と検証

本研究では方位角の自動判定システムを構築することを念頭に、撮影画像とGoogle Street Viewのパノラマ画像を等角度（ここでは北を0度として10度間隔）に分割した画像に対して類似度を計算し撮影方向の推定を行う。ここでは、既往の特徴点抽出手法として(SIFTとORB)と深層学習に基づく手法(VGG16, DenseNet, EfficientNet80, InceptionV3, ResNet50)を適用する。本研究で対象とした地域はさいたま市内の主に第1種中高層住居専用地域とその周辺地域である。

ARで構築した火災状況の画像を写真1に、撮影地点(3点)と方位角を図-2に示す。また解析結果を表1に示す。撮影画像の緯度経度に最も近いGoogle Street Viewのパノラマ画像を利用した。36枚に分割した画像の類似度を降順にソートし、上位1位が対象画像の方位角 $\pm 30$ 度の範囲に入っているものをL1, 2位をL2, 3位をL3として、それ以外をFと判定した。表-1によれば従来の特徴点抽出手法は深層強化に基づく手法と対比して推定精度が低い。特に木造家屋に囲まれるA地点での推定に不向きな傾向が見られる。



写真-1 ARによる火災画像（左からA, B, C地点）



図-2 撮影地点（赤丸：東からA, B, C地点）と撮影方位角

表-1 従来法による方位角推定結果の比較

Method	SF	OB	VG	DN	EN	IC	RN
Photo A	F	F	L1	L1	L1	L1	L1
Photo B	L3	L2	L2	L2	L1	L1	L1
Photo C	L1						

### 3.3 PLATEAUモデルとUnityを活用した2次元画像の再現と火災位置の特定手法の一提案

本研究では、統合プラットフォームUnityを用いて特定手法のシステムを構築する。前項で対象とした地域内の建物モデルを図-3のように3次元空間情報として読み込み、前項の撮影画像の緯度経度上に仮想カメラを設置する。火災位置を特定する方法は、仮想カメラの方位角を撮影画像と合わせ、撮影画像と仮想カメラ画像を一致させた上で、撮影画像上の火災位置を仮想カメラの画像上にオーバーラップさせる。画像上で火災位置をマウスのポインタで指定すると、仮想カメラ中央からその方向に200m長のBeamオブジェクトを照射する機能を構築している。この作業を3つの撮影画像に対して繰り返すことで、Unityの都市空間上に3つのBeamオブジェクトが表示され（図-3）、その交点は火災位置を良好に特定できていることがわかる（図-3右下）。

図-2のように、撮影地点と撮影方位の情報のみでは火災位置を特定することは容易ではないが、本手法のように3次元空間情報と2次元画像をリンクさせることで、火災位置を特定できる可能性が示された。こうした手法は、複数個所での火災が生じた際や、一連の作業を自動化する際に役立つものと推察される。

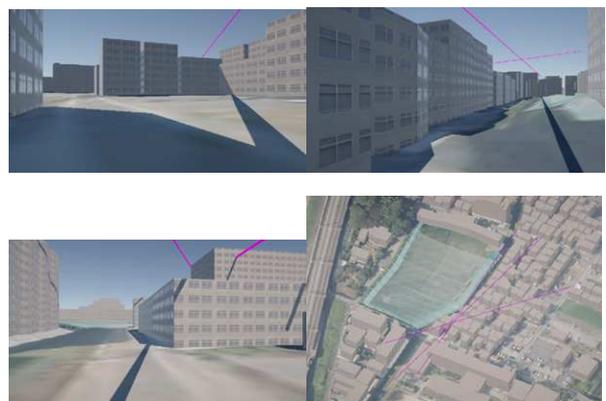


図-3 Unity内に設置したCameraの撮影画像とビーム照射の様子（左上からA, B, C地点, 全体）

### 3.4 本節の結論

方位角推定手法の検証は今後の詳細な検討に向けた試行的な位置づけであり、用途地域の違いや地域の特徴などを踏まえた更なる検討を行う必要がある。また、PLATEAUを活用した災害（火災）位置の特定方法は、災害時の家屋倒壊状況などを自動で推定できる可能性を示唆するものであった。

## 4. 浸水要因河川を考慮した避難支援

### 4.1 本節の研究背景と目的

河川堤防を越えし破堤に至る洪水被害が頻発している。ハード整備だけではなく、避難などのソフト対策に加えて、まちづくりや住まい方という視点での対策が必要である。研究対象の埼玉県川島町は、荒川本川とその支川群（市野川、入間川、越辺川、都幾川）に囲まれた地形になっており、破堤河川・破堤箇所により氾濫流の向きが大きく異なる。本研究では、異なる想定破堤河川・破堤点に対する避難解析を行うことで、川島町での避難困難地域を明確にすることを目的とする。

### 4.2 解析モデル

小内ら（2021）の氾濫解析（15の破堤点）より得られた浸水深の時系列データを用いて、藤野ら（2025）は川島町内の各家屋から避難所への避難解析を行った。本報告では藤野ら（2025）の解析の詳細データをもとに避難に失敗する可能性のある地域を明らかにする。

### 4.3 結果と考察

図-4に破堤点No.5の場合の破堤2時間時点での各グリッドの最大湛水深と避難状況を示す。避難所と氾濫流にはさまれた地域付近の避難失敗者（黒色）が多い。加えて、土地の低い南西方向に向かう氾濫流の影響と安藤川の内水氾濫の影響をうけて広い範囲で避難失敗または避難途中（赤色）となっている。

15の想定破堤における避難解析において、すべて成功した場合を水平避難可能エリアと定義した。水平避難可能エリアと判断された地域以外では、二階への垂直避難、避難指示が出た段階から時間をおかないタイミングでの避難、町外避難が必要になる。図-5は水平避難か垂直避難のどちらかが可能な地域を避難可能エリア（灰色）、水平避難可能エリア外かつ浸水深が3m以上となる地域（水色）、国土交通省が公開している家屋倒壊等想定氾濫区域（赤色）で避難特性を分類したものである。この分類図で水色と赤色の地域は街の中でも相対的に危険度が高いため、早期の水平避難（避難所か町外）が望ましい。

灰色の地域は早期の水平避難ができなかった場合は垂直避難を行うべき地域となる。

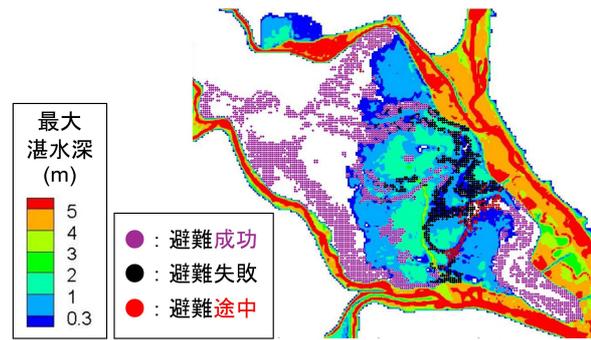


図-4 破堤2時間後の氾濫状況と避難状況（破堤点No. 5の場合）

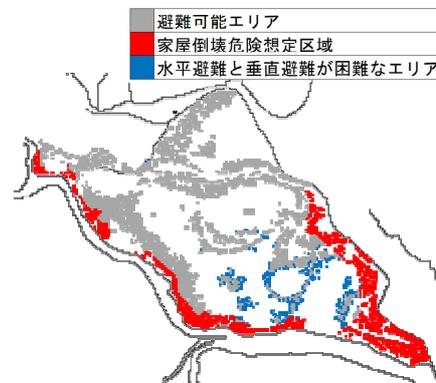


図-5 避難特性分類（避難可能エリア（灰色）は水平避難か垂直避難のどちらかが可能、水平避難に失敗しかつ家屋にとどまっても浸水深が3m以上となる地域（水色）、家屋倒壊等想定氾濫区域（赤色）は国土交通省が公開しているもの）

### 4.4 本節の結論

破堤点毎の避難上の弱点を明らかにした。特に、安藤川の内水氾濫地域と破堤氾濫流にはさまれるような状態になる避難所付近で局所的に大きな避難困難者となることなどの地域性を明らかにした。水平避難が困難でかつ2階への垂直避難も困難な地域が安藤川周辺と地盤高が低い出丸地区周辺にあることを明らかにした。

## 5. 降雨段階別の浸水要因表示と流域治水対策

### 5.1 本節の研究背景と目的

浸水被害には外水氾濫、内水氾濫、内水湛水などがあるが、地域・流域の特性によって浸水被害の要

因や発生頻度は異なる。また、浸水被害が発生する降雨条件も異なる。さらに、近年の豪雨災害では、複数の浸水要因が重なることもある。浸水要因ごとに効果的な治水対策は異なるため、浸水要因を分析することが重要である。

本節では、豪雨や洪水による浸水被害を受けやすい特徴を有する中川・綾瀬川流域を対象に、各支川で優先すべき治水対策の判断を支援することを目的として、分布型降雨流出氾濫解析モデルを開発する。

## 5.2 解析対象流域（中川・綾瀬川流域）の特徴

埼玉県と東京都を流れる中川・綾瀬川流域（流域面積約987km<sup>2</sup>）を対象地域として選定した。中川・綾瀬川流域は、ほぼ全域が標高20m以下の低平地であり、河川勾配も1/4000程度と緩勾配である。昭和33年9月の狩野川台風や昭和41年の台風4号では、それぞれ流域面積の約28%、約46%が浸水するような大きな被害が生じた。その他にも、大規模な浸水被害が多数発生している。このような背景を踏まえて、中川・綾瀬川流域では、河川整備のみによる治水対策が困難であるとして、流域における総合的な治水対策が昭和55年から協議され、放水路や排水機場の整備など、様々な治水対策が実施されている。

## 5.3 分布型降雨流出氾濫解析モデルの概要と解析条件

中川・綾瀬川流域における分布型の降雨流出・氾濫解析モデルを開発するため、中川・綾瀬川を含む28河川の河床高や川幅、堤防高をモデル化した。また、当該流域に複数存在する伏せ越しの流れを平面二次元で解析可能な手法を構築した。さらに、昭和53年から実施されている治水事業（三郷放水路（図-6）、綾瀬川放水路、水門や排水機場、首都圏外郭放水路など）をモデル化した。その他、調節池や調整池、田んぼダムの影響を考慮可能な初期モデルを構築した。

昭和33年9月の降雨ハイエトグラフを、流域平均雨量217mm/48hrの雨となるように変更し、流域全体に降水量を与えた。

## 5.4 結果と考察

図-7に、各支川の湛水量と累加雨量の比を示す。ここで、河道内・調整池・水田・田んぼダムの用排水路の貯留量、河川下流への排水量、他の支川流域への流出量を除く、各支川流域の堤内地に湛水している水量を湛水量とした。この比が大きいほど、浸水被害の危険度が大きいことを意味する。28河川の

うち、綾瀬川(2)、垢川(9)、青毛堀川(24)、中川(1)、新方川(15)では、特にこの比（湛水量／累加雨量）が大きい。特に市街化の進んでいる南側の流域において浸水被害大きい傾向となっている。

## 5.5 本節のまとめと今後の課題

中川・綾瀬川流域の分布型降雨流出氾濫解析モデルを開発し、浸水被害を受けやすい支川を示した。

この分布型モデルに、開発済みの浸水被害要因分離手法（小田ら，2024）を適用し、各支川の浸水被害要因の分析を行う必要がある。その結果を踏まえて、田んぼダムや耕作放棄地の活用、その他の治水対策を含めた流域治水対策の効果を総合的に比較すること、治水対策によりリスクが増加する地域の分析も合わせて行うことが重要である。

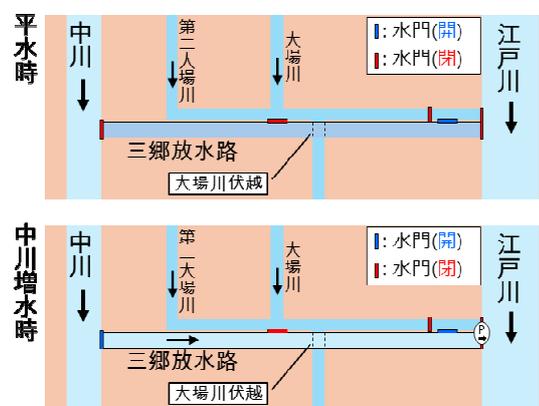


図-6 三郷放水路の概要

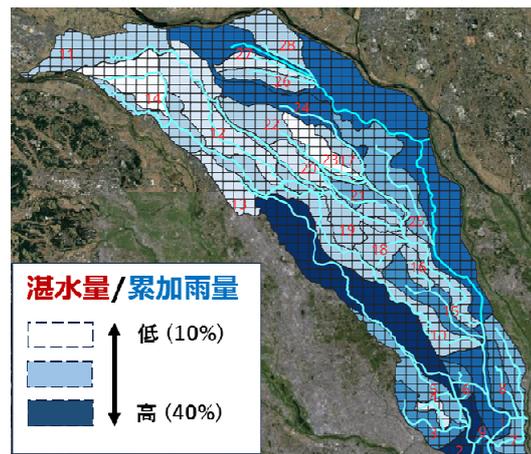


図-7 各支川流域における湛水量と累加雨量の比

## 6. 微地形と気象レーダデータを統合したリアルタイム浸水深推定技術の開発

### 6.1 本節の研究背景と目的

近年、台風や集中豪雨の増加に伴い、各地で多くの内水氾濫が生じている。これに対応すべく、国土交通省の国土技術政策総合研究所をはじめ、いくつかのリアルタイム浸水予測システムが開発されつつあるのが現状である。しかるに、多発する内水氾濫に対して、未だリアルタイムで浸水予測情報は少なくともマスメディアからは伝わってこない。一方で、県や市からは、避難所設立など、発災後の準備をするために、床上・床下浸水の被害領域がどの程度なのかに関する情報を、概略でも早い段階で収集したいというニーズがある。

そこで本研究では、埼玉大学に設置されている世界最新とよばれるマルチパラメータフェーズドレイ気象レーダ（以後、MP-PAWRとする）の30秒ごとに観測されている全天の雨滴分布を用いて、内水氾濫に特化した、リアルタイム浸水深推定技術を開発することを目的とする。特に、各地域特有の微地形の情報を積極的に取り込み、地域密着型の仕様とする。

### 6.2 微地形と浸水実績

内水氾濫が発生するような場所には微地形的な特徴がある。平野部によく見られる氾濫平野や後背湿地、台地と低地の境界に位置する支谷閉塞低地などである。一例として、図-8に自然堤防に囲まれた氾濫平野の例を示す。左図は、国土地理院の治水地形分類図に加筆したものであり、右図は、治水地形分類図に内水ハザードマップをGIS上で重ね合わせたものである。図より、比高3mのお盆状の微地形と浸水領域がよく対応していることがわかる。雨水は低いところへ流れて集まるので当然の結果ではあるが、浸水深を推定するためには、この2km四方の領域における総雨量と排水能力を知る必要がある。

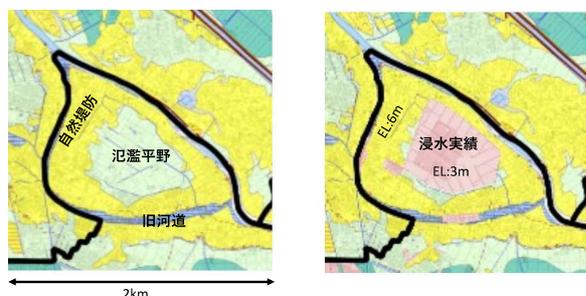


図-8 微地形と浸水実績の一例（国土地理院治水地形分類図と越谷市内水ハザードマップを使用）

### 6.3 2023年6月の越谷市周辺での内水氾濫

2023年6月の越谷市周辺での内水氾濫を対象として、浸水深推定のプロトタイプを作成した。

はじめに、越谷市の内水ハザードマップと2023年6月の浸水実績を比較した。その結果、ハザードマップの領域よりも広い範囲で浸水が生じていたことが確認された。そこで、2023年6月2日0時から6月3日24時のMP-PAWRデータを、市販のArc-GIS内の洪水シミュレーションへ入力し、1時間ごとの浸水領域を求めた。一例として、時間降雨量のピークとなった6月3日1時時点の浸水シミュレーション結果を図-9に示す。なお、浸水実績は、越谷市内のものであり、隣接する松伏町等の実績は含まれていない。局所的な降雨量の時間変化や、排水能力については未検討な段階であるが、浸水実績と、右図で色の濃い浸水深が大きい箇所は概ね対応している。

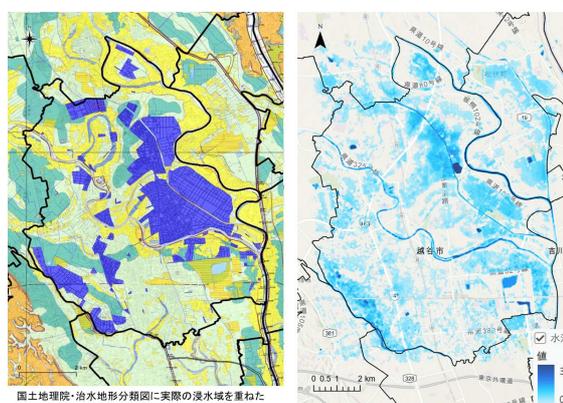


図-9 MP-PAWRデータを用いた浸水シミュレーション結果（右）と同領域の浸水実績（左）の比較

### 6.4 対象領域全体としての排水能力

都市化された地域では、下水道等の都市インフラが整備されているため、浸水深を推定するためには、総雨量だけではなく、どの程度排水されたかを知る必要がある。本研究では、局所的に集水域を構成している微地形領域を抽出し、下水道設備など複雑化している都市インフラの情報をすべて取り込むのではなく、MP-PAWRから算出された総雨量と、実測された浸水深との関係を調べ、総雨量がその領域に溜まった場合との差を算出することによって、「対象領域全体としての排水能力」として評価する。

越谷市では、2023年の浸水被害を受けたことを受けて、市内の要所要所に浸水センサを設置している。市との協力関係を築くことにより、対象とした領域における情報がリアルタイムで得られるならば、MP-PAWRのリアルタイムデータとの統合により、迅速な浸水深推定技術へと向上させていくことが可能

である。

## 7. UAV3次元モデルを用いた橋梁周辺の地形変動の定量評価手法

### 7.1 本節の研究背景と目的

近年、地球温暖化の影響により、世界各地で集中豪雨や洪水の頻度が増加しており、それに伴い橋梁構造物への被害も顕著になっている。特に洪水に伴う橋台や橋脚周辺の洗掘は、構造的安定性を著しく損ない、橋梁と周辺道路と切断される要因にもなる。従来、災害時の橋梁被害の評価は、図-10に示すように、応急点検と詳細調査という二段階のプロセスに依存してきた。しかしながら、このような手法は、現地へのアクセス制限や専門技術者の不足などにより、初動対応が遅延するという課題があった。



図-11 Sabaki Bridge被害前後の比較



### 7.2 ケニア洪水による橋梁被害

2024年ケニアでは異常気象による大規模な豪雨が発生し、各地で深刻な洪水災害が発生した。特に複数の橋梁において甚大な構造被害が報告されており、その中でも以前著者らが調査されていたSabaki橋、図-11に示すように、およびThwake橋の被害もあった。



図-12 Sabaki Bridgeの洗掘面積の抽出

### 7.3 UAVを用いた調査と被害の定量評価

Sabaki橋では、洪水後にUAVを用いたビデオ撮影が実施され、SfMにより高精度な三次元モデルが構築された。これにより、作成されたオルソフォトと衛星写真との比較を通じて、図-12に示すように、洗掘による地表の変化を面積的に定量評価することが可能となった。



図-13 Thwake Bridge2022年(上)と2024年(下)

Thwake Bridgeでは、2022年の洪水で橋台背面の土が洗掘され、その状況を記録するためにUAV撮影が行われ、図-13に示す3Dモデルとしてアーカイブされた。2024年では補修が実施されてから洪水を経験し、その後でUAV撮影を実施した。両者の比較により、洪水前後の堤防の変化を図-14のようにDEMの差分により比較することが成功した。



図-10 従来の被害調査(上)と提案手法(下)の概要

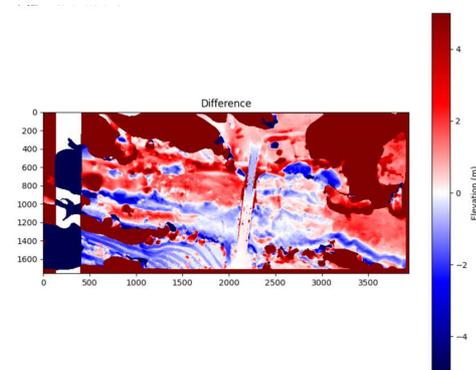


図-14 Thwake Bridge DEMの差分

## 8. 斜面の変位速度のふらつきによる崩壊予兆検知

### 8.1 斜面崩壊の予兆検知

主に降雨による斜面の表層崩壊の予兆を検知するために、表層に挿した鋼棒の微小な傾斜変位をセンサで連続的に測定し、異常を検知する技術を開発している。図-15に例示するように、斜面は突然崩壊するのではなく、崩壊までの過程で数日～数時間かけて微小だが継続的で加速的な傾斜変位が見られる。これをセンサを用いて早期に捉えて、何らかの判断基準の下に早期警報を出す仕組みを考えている。

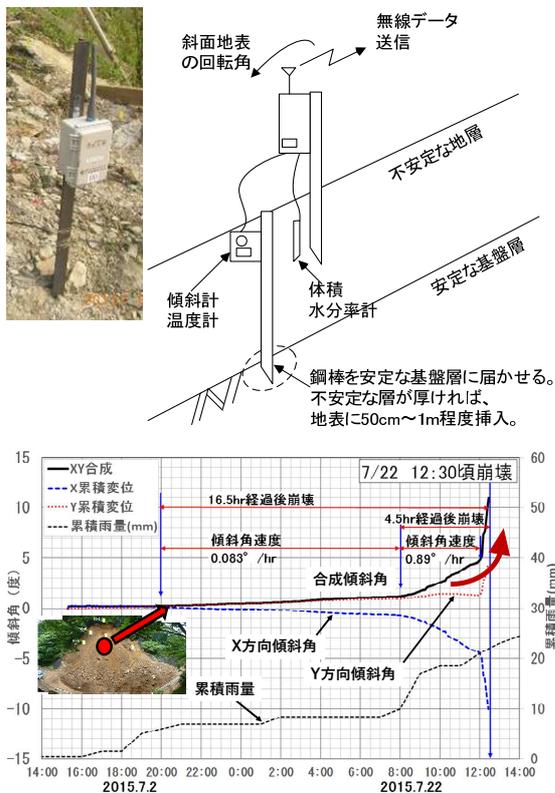


図-15 斜面表層の傾斜変位センサと崩壊前の典型的な挙動

### 8.2 変位速度のふらつきに注目した予兆検知

本研究では、この微小な変位の進み具合から、どのような基準で崩壊の切迫度を評価し、警報を出すべきか、模型実験や実斜面の計測データを分析して検討した。斜面の崩壊予測に関しては、「変位速度の逆数と崩壊までの残余時間が比例して減少する」という経験則があり、速度逆数法としてよく使われている。数理的には、各時点での速度と時間の関係であるから、比較的短い区間の時間、例えば「崩壊の1時間前の数分間」の速度の変化だけを見て、以後

の崩壊までの推移を予測することができる。実際には、変位の進行には、表層地盤の不均一性や雨の降り方の変化など、様々なノイズ要因のため、図-16のように崩壊予測時間は大きく変動する。しかし、崩壊が近づくと、崩壊予測時間がぶれなくなり、速度逆数法のモデルに沿った挙動になることを本研究で見いだした。これにより、斜面表層が崩壊の最終段階に入った切迫した状況である事を検知できる可能性がある。

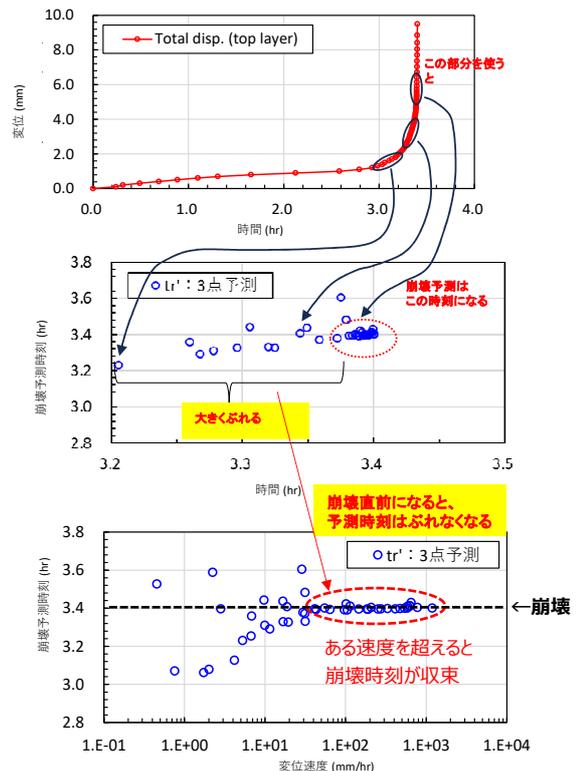


図-16 速度逆数法による崩壊時間の予測のぶれと切迫した状態の検知

## 9. さいたま市在住ネパール人の災害意識と災害情報伝達の課題

### 9.1 本節の研究背景と目的

日本では地震や台風などの自然災害が頻発し、外国人住民も被災リスクにさらされている。図-17のように、2023年には外国人住民数が300万人を超え（Statistics Bureau of Japan (2024)）、今後さらに増加が見込まれる（Ministry of Foreign Affairs of Japan (2024)）。言語の壁だけでなく、文化的背景や地域社会とのつながりの不足が災害対応を困難にしている。2024年の能登半島地震でも、避難所で食事が合わない、避難経路が分からないといった問題が報

告された (Piao et al. (2024))。本研究は、さいたま市在住のネパール人住民に焦点を当て、その災害意識と備えを調査し、地域レジリエンス向上に資する知見を得ることを目的とする。

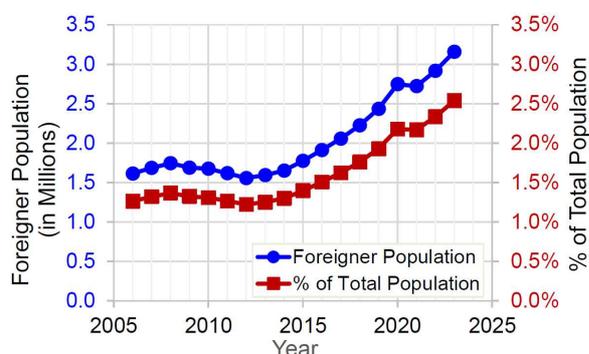


図-17 日本における外国人人口

## 9.2 方法

2024年9月から10月にかけて、さいたま市に在住する15歳以上のネパール人住民1,663名を対象にアンケート調査を実施した。質問は32問で構成し、日本語・英語・ネパール語で回答可能とした。郵送およびオンラインで回答を受け付け、191件の有効回答を得た(回答率11.5%)。さらに、2024年11月にはワークショップを開催し、住民が災害時に直面する課題や改善策を議論した(写真-2)。

## 9.3 結果

アンケートの結果、避難所の場所を知らない住民は65%、避難経路を把握していない住民は64%、災害訓練に参加したことがない住民は91%に上った。また、82%が自治体から防災情報を受け取っていないと回答した。避難所においては、宗教的配慮の欠如が滞在継続の障害になることも示された。ワークショップでは、多言語での情報発信、地図アプリを活用した避難案内、文化的背景を踏まえた避難所運営、地域住民との交流促進が重要な改善策として挙げられた。

## 9.4 本節の結論

本研究は、さいたま市在住ネパール人住民の災害意識と備えに多くの課題が存在することを示した。言語や文化の多様性を踏まえた情報提供と、地域社会との関係性構築が不可欠である。今後は、アンケートとワークショップで得られた提案を行政施策に反映させることが、地域レジリエンスを高める上で重要となる。



写真-2 2024年11月に実施したワークショップの様子

## 10. おわりに

本研究は、災害時における行政の意思決定を支援する情報可視化アプローチを構築することを目的に、衛星・SNS・ビッグデータ・地理空間情報等を活用した被害把握や予測、避難支援に加え、外国人への情報伝達を対象とし、防災DXを通じて地域防災力向上に資する知見を提示した。今後は、研究開発した技術の精度検証と具体的な利用に向けた実証を重ねていく予定である。

## 謝 辞

本研究は令和6・7年度京都大学防災研究所地域防災実践型共同研究(特定)課題番号2024RS-01研究課題「防災DX時代における行政の意思決定を支援するための新たな情報可視化アプローチの開発と実践」の成果による。本研究の遂行に際し、京都大学防災研究所の畑山満則教授ならびに廣井慧准教授より、多くの貴重なご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 小田竜生, 田中規夫, 五十嵐善哉 (2024) : 内水・外水氾濫と土砂災害が発生した流域の災害要因分離が可能な分布型モデルの構築, 土木学会論文集, 80(16), 23-16011.
- 小内堯, 田中規夫, 伏見健吾, 五十嵐善哉 (2021) : 破堤点の相違による氾濫特性を考慮した避難解析にもとづく地域に適した避難手法分類, 土木学会論文集 B1(水工学), 77.2: I\_1513-I\_1518.
- 藤野晃慈, 五十嵐善哉, 田中規夫, 小内堯 (2025) :

浸水情報による目的地の変更を考慮した避難解析手法の構築と洪水時の安全避難に関する検討, 土木学会論文集B1(水工学) , Vol. 81, No. 16, 24-16213.

Ministry of Foreign Affairs of Japan (2024): Specified Skilled Worker Program

<https://www.mofa.go.jp/mofaj/ca/fna/ssw/us/>

Piao, M., Kondo, A., Qian, H. (2024): Factors related to

immigrants' disaster preparedness: A scoping review, Health Emergency and Disaster Nursing, DOI: <https://doi.org/10.24298/hedn.2023-0008>.

Statistics Bureau of Japan (2024): Population Stats.

<https://www.stat.go.jp/english/data/jinsui/2.html>

# 2024年能登半島地震により発生した地震地すべりの地質要因の究明 —主に崩壊深度5m以上の深い地震地すべりを対象として—

荒井紀之\*

\* 京都大学防災研究所

## 要 旨

2024年能登半島地震(M7.6)により発生した崩壊深度5m以上の地震地すべりの地質要因を調べるために現地調査を行うとともに、地理情報システムを用いた分析を行った。地震地すべりの分布密度は、大まかな傾向として震源断層とされる南東傾斜の逆断層からの水平距離に応じて減少する傾向にあり26kmではほぼ収束する。能登半島には古第三系から新第三系の安山岩、デイサイトや流紋岩の火山岩や火砕岩、堆積岩が主に分布している。特に地震地すべりが集中して発生したのはデイサイトや流紋岩の火砕岩分布域であり、次いで珪質シルト岩の分布域であった。一方、穴水町の丘陵では、震源断層から22km離れているものの、地震地すべりが発生し住宅が被災した。これらの中から集中調査域を設定し、地質構造や風化、変質の程度を調査した。その結果、大規模地震地すべりは厚い火砕岩と細互層や、海緑石砂岩と珪質シルト岩の岩相境界や層理面、小断層、節理等の地質不連続面を利用しながら主に流れ盤斜面で発生していることが分かった。穴水町の丘陵地帯では、ハロイサイトを含む変質した細粒デイサイト火砕岩が傾斜角約12°のゆるい流れ盤をなし、これがすべり面となって地震地すべりが発生した。

## 1. はじめに

能登半島では、2024年能登半島地震(M7.6)による地震地すべりの発生と、同年9月の豪雨による土砂災害が重なり、甚大な被害が発生した。国土地理院(2024)により、地震発生後ただちに実施された空中写真撮影とその判読により、地すべり・崩壊分布がホームページ上で公表された。また、林野庁と国土地理院により、地震後に能登半島全域の航空レーザ測量が実施され、崩壊判読図や亀裂分布がG空間情報センター(2024)で公表された。これらのデータは、その後の救助活動や復興事業、研究活動の基本データとなった。この崩壊分布に着目すると、震度6弱以上の強震域内でも、地すべりの集中域が複数存在し、逆にまばらな場所が存在する。阿部ら(2024)によると、5万分の1地質図幅「珠洲岬、能登飯田及び宝立山」と、国土地理院が判読した地すべり分布との比較により、中新世のデイサイト・流紋岩の火砕岩や珪質シルト岩で崩壊が多く発生したことを指摘した。一方、地震地すべりの集中域ではないが、穴水町では低比高の丘陵地で地震地すべりが発生し複数の住

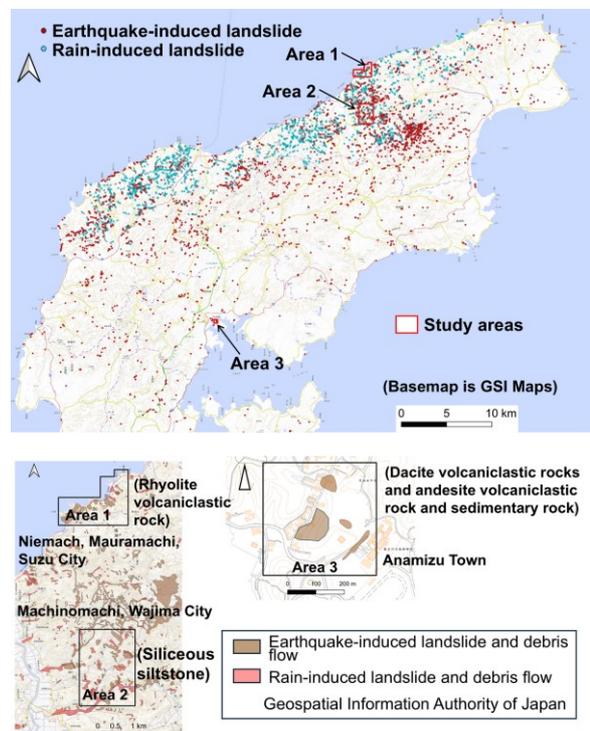


Fig.1 Locality map of the study areas.

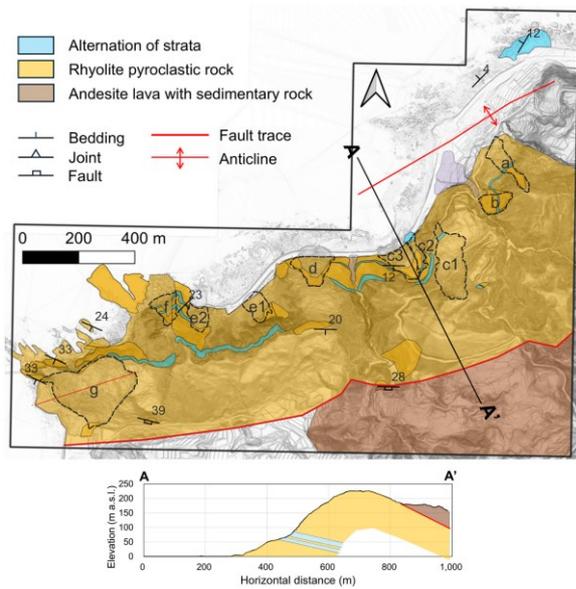


Fig.2 Geological map and cross-section of Area 1.

宅が被災した。本研究の目的は、以上の三つの地域の地震地すべりの内、主に崩壊深度が5m以上の地震地すべりの地質要因を明らかにすることである。大規模地震地すべりが発生すると、その斜面下にしばしば天然ダムが形成され、溪流の堰き止めが発生する。能登半島では2024年9月の豪雨により、これらの天然ダムが破堤し、土石流として流下し地震災害に加えて下流域に甚大な被害をもたらした。

## 2. 研究方法

### 2.1 研究域の選定

2024年能登半島地震により地震地すべりが集中した地域および穴水地域を対象として三つの研究域を設定した(Fig.1)。

エリア1 珠洲市仁江町, 真浦町 (流紋岩火砕岩)

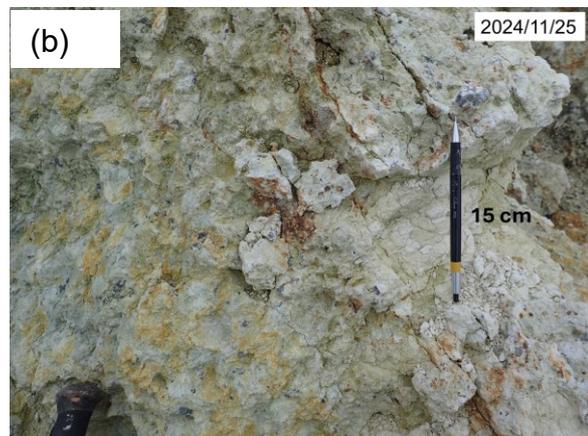
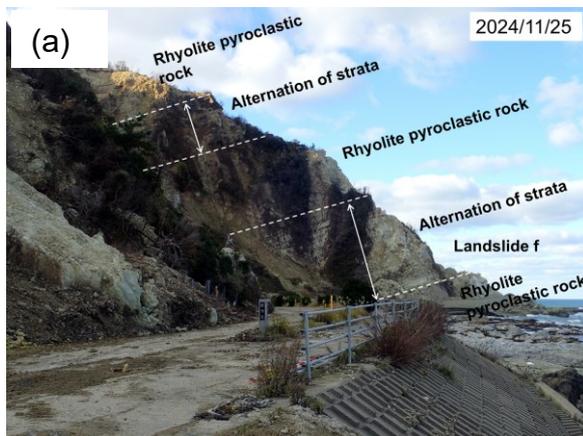


Fig.3 Photographs of the outcrops in Area 1. (a) The outcrop of the rhyolite pyroclastic rock and alternation of strata. (b) Rhyolite pyroclastic rock. The date of each photograph is noted.

エリア2 輪島市町野町 (珪質シルト岩)

エリア3 穴水町 (デイサイト・安山岩火砕岩および堆積岩)

### 2.2 地質調査

地質調査では、研究域内の地質分布、地質分離面(層理、断層、節理等)の向き、風化・変質の程度を記載した。

エリア1では、棒状プランジャーのN型シュミットハンマーにより地山や崩壊堆積物中の岩塊のリバウンドハンマー反発度を測定した。測定方法は、地盤工学会基準JGS3411:2010に準じ、打撃角度の違いを補正し補正後反発度R0を求めた。崩壊堆積物やすべり面付近の粘土を採取し、X線分析(x-ray diffraction analysis, XRD)を行い、含有鉱物を同定した。必要に応じて岩石薄片を作成し、偏光顕微鏡による観察を行った。エリア3では、すべり面より直径5cm、高さ5cmの採土管により不攪乱試料を採取し、室内透水試験(変水位)と緩速せん断(せん断速度 $\approx 0.02\text{mm/min}$ )による一面せん断試験(CD試験)を行った。また、ブロックサンプリングを行い3軸圧縮試験(UU試験)(株式会社セントラル技研に外注)を行った。

地質調査の実施時期は、2024年5月, 11月, 12月と2025年4月, 5月であり、延べ18日である。

### 2.3 地震地すべりの抽出と形状分析

地震地すべりの用語の定義については、日本地すべり学会(2012)に従い、「地震動およびそれに伴う力学的作用に関連して発生する地すべり」とした。この地すべりは広義の意味であり、表層崩壊や深層崩壊、岩屑流を含めて使用する。

地震発生前後の0.5mメッシュの数値地形モデル(digital terrain model, DTM)を入手し、その標高差分を

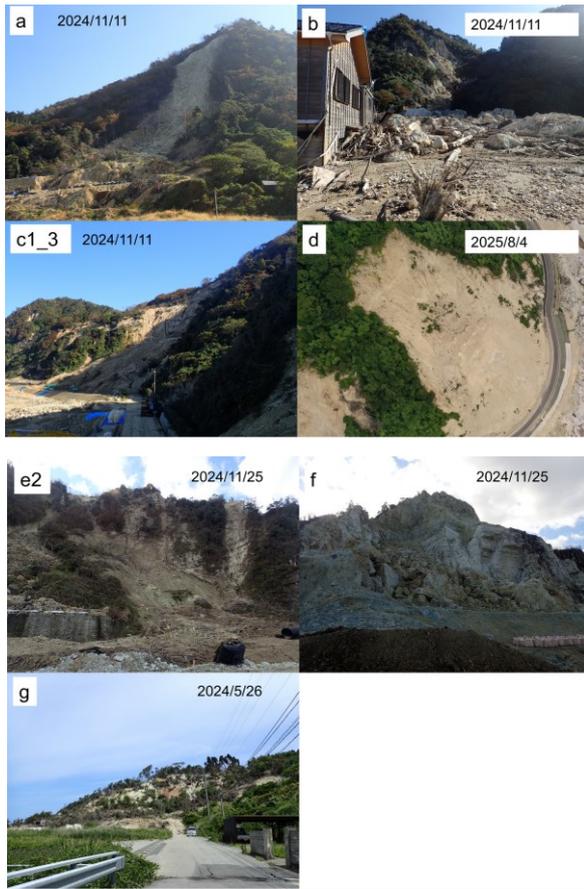


Fig.4 Photographs of the earthquake-induced landslides in Area 1. The date of each photograph is noted.

とることにより、おおまかに侵食域と堆積域を区分するとともに、縦断面図を10mから20m間隔で作成し、平均断面法により地山換算の地すべり体積を推定するとともに地すべりの形状分析を行った。

国土地理院のホームページから、研究エリアの地震地すべりが含まれる空中写真を入手し、ステレオフォトメーカーPro(Ver.6.16)により立体視し、個々の地震地すべりの崩壊形状を観察した。

### 3. 結果

#### 3.1 エリア1

東北東—西南西方向に伸びる海岸沿いの急崖に沿って多数の地震地すべりが発生した。国道249号線の逢坂（ほうさか）トンネル周辺では大規模な地震地すべりが発生し、南側トンネル坑口が埋没した。

##### (1) 地質

Fig.2にエリア1の地質図と地質断面図を示す。

海岸沿いには、厚い流紋岩火砕岩中に火山碎屑物からなる砂岩やシルト岩の細互層が挟在し、層理面は南南西から南南東方向に12°から33°傾斜している (Fig.3)。

流紋岩火砕岩は、複数のフローユニットから構成され、流紋岩の岩塊を含む凝灰角礫岩と、流紋岩礫や軽石を含む火山礫凝灰岩、軽石凝灰岩、凝灰岩からなる。溶結部が認められないことから水中火砕流堆積物と思われる。

流紋岩火砕岩は、XRD分析により、沸石の一種で

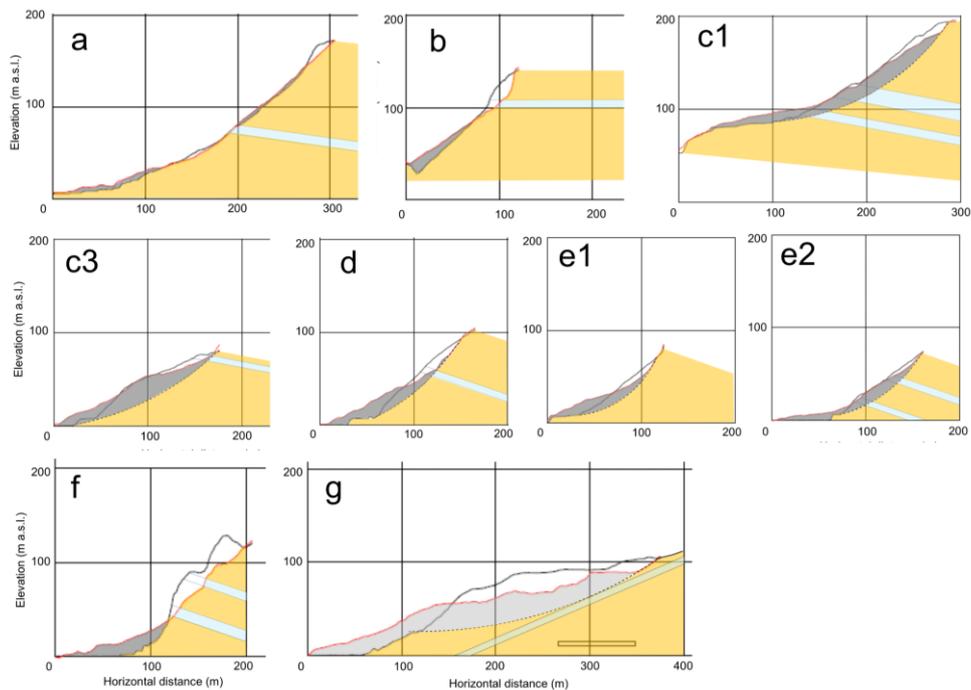


Fig.5 Geological cross-sections of the earthquake-induced landslides in Area 1. The other legends are the same as in Fig.2.

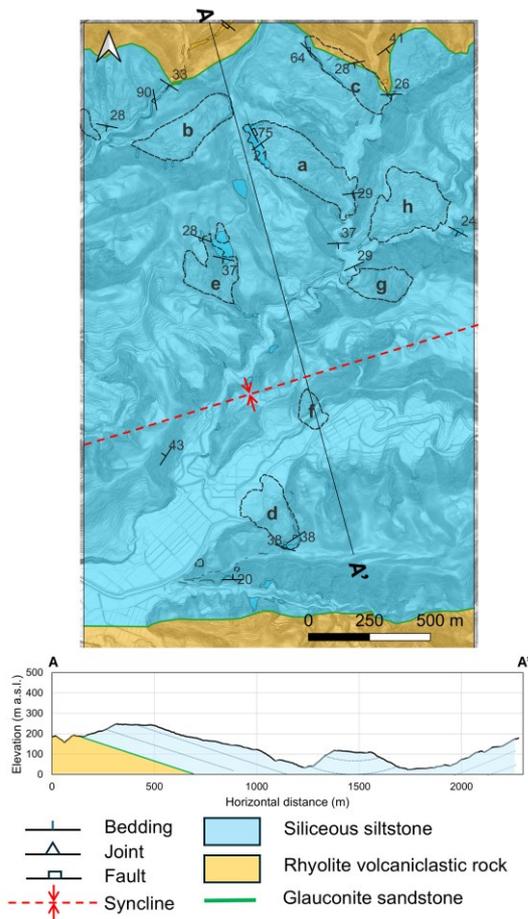


Fig.6 Geological map and cross-section of Area 2.

あるモルデン沸石，一部に斜プチロル沸石を含み，粘土鉱物として一部にスメクタイトが含まれる。研究域の南側には，南に約30°傾斜した西海断層（Ishida, 1959）が横断し，その上盤側には安山岩溶岩が分布する。

### (2) 地震地すべり

Fig.4に地震地すべりの代表的な写真を，Fig.5に，aからgの地震地すべりの推定断面図を示す。

厚い流紋岩火砕岩と一部に細互層を挟在する海岸沿いの急崖からなる斜面において，大規模な岩盤地すべり（Fig.2 g），割れ目沿いの岩盤崩壊（Fig.2 b, f）の他，崩積土中の地すべり（Fig.2 d, e1, e2）が含まれる。

逢坂トンネルが位置する流れ盤斜面では，細互層を底面として，厚い流紋岩火砕岩が大規模に崩れ，国道や逢坂トンネル坑口を埋積した。地震後に，地すべりブロック内を観察した結果，国道沿いでは，火山礫凝灰岩からなる岩塊が崩壊堆積物中に含まれていた。これらの岩塊のシュミットハンマーの補正後リバウンドハンマー反発度R0は22～26である。地すべりの北側の道路沿いには暗灰色の流紋岩礫を含む成層した火山礫凝灰の露頭が観察され，南南西へ

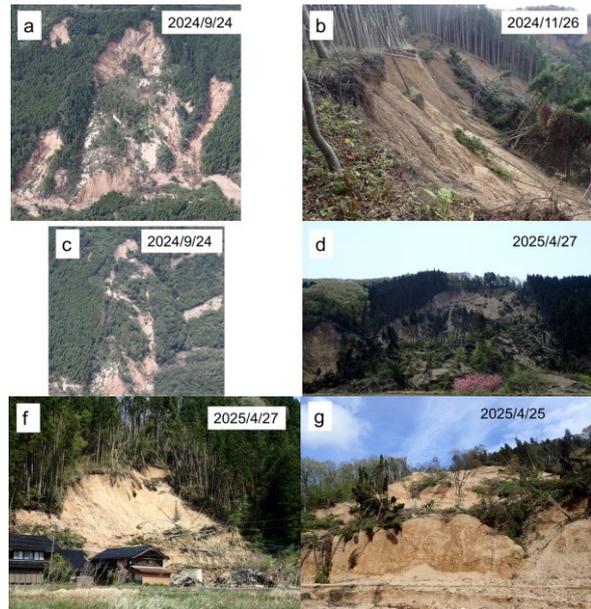


Fig.7 Photographs of the earthquake-induced landslides in Area 2. The date of each photograph is noted.

33°傾斜していた。R0は，27～30である。標高70mから100mの地すべり北側側方崖沿いには風化した細粒凝灰岩や火山礫凝灰岩が分布し，ハンマーの軽打で容易に崩すことが可能である。地震発生前の傾斜量図を判読すると，幾つかの狭義の地すべりが存在するが，今回の地震地すべりは既存のすべり面沿いで発生したのではなく，新たにより深い深度にすべり面が形成されたものと推定される。

## 3.2 エリア2

珪質シルト岩が分布する地域において，表層崩壊の他，中から大規模な地震地すべりが多数発生した。

### (1) 地質

Fig.6にエリア2の地質図と地質断面図を示す。栗倉層（吉川ら，2002）に属する流紋岩火砕岩が南側と北側に分布し，層厚1mから2mの海緑石砂岩層を介して珪質シルト岩が分布している。研究域の南部には東北東—西南西方向の開いた向斜軸が位置している。珪質シルト岩は，塊状無層理な部分と，泥岩と互層をなす部分からなる。

前述したように，海緑石砂岩層が，下位の栗倉層との境界に含まれる他，珪質シルト岩中にも少なくとも1層含まれる。

### (2) 地震地すべり

Fig.7に地震地すべりの代表的な写真を，Fig.8に，aからhの地震地すべりの推定断面図を示す。

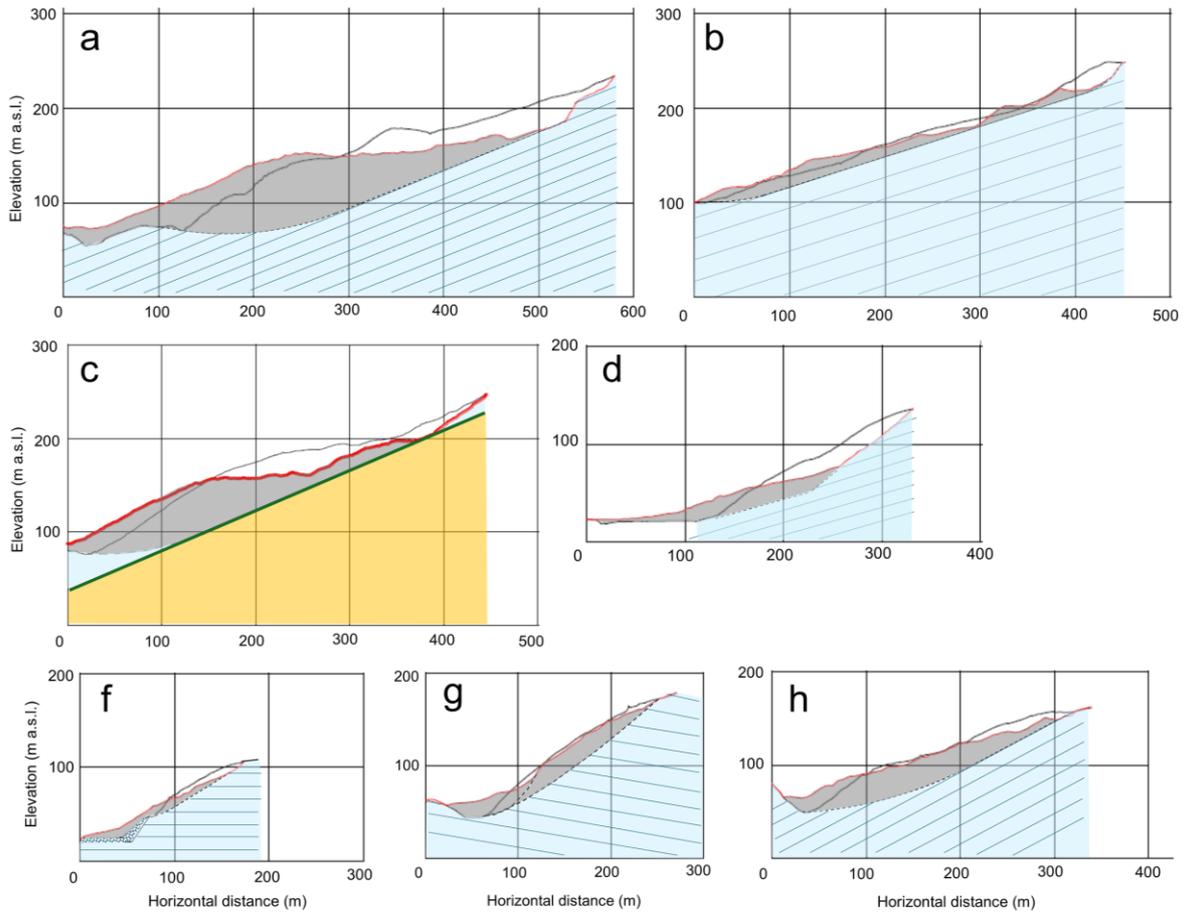


Fig.8 Geological cross-sections of the earthquake-induced landslides in Area2. The blue lines indicate bedding. The other legends are the same as in Fig.6.



Fig.9 Photographs of the gravitational shear-zones in the landslide d, Area 2. (a) The outcrop of the gravitational shear zones in siltstone. (b) Close-up view of the gravitational shear zone in (a). The date of each photograph is noted.

珪質シルト岩、一部に海緑石砂岩層からなる流れ盤斜面において、中から大規模な岩盤すべりタイプの地震地すべりが発生した。層理面と、節理、シームからなるくさび状地すべりが含まれる(Fig.6中のa, c, d)。

地すべりdでは、珪質シルト岩中に形成された重力性のせん断帯がすべり面の一部を形成した可能性がある(Fig.9)。

地震地すべり発生前に、斜面下部に小崩壊(Fig.6中の b, d, g)や浅い小規模な地すべりが含まれる場

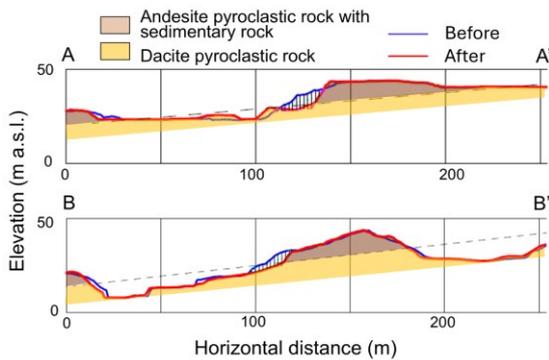
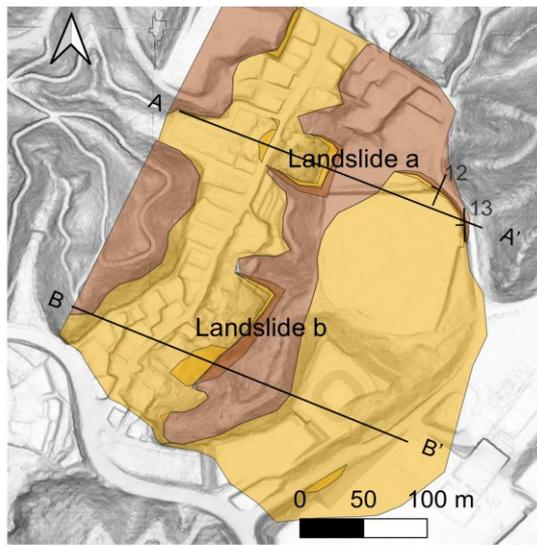


Fig.10 Geological map and cross-sections of Area 3.

合が多い。

一部に、再活動型の地すべり(Fig.6 h)が含まれる。

地すべり前の斜面傾斜角に着目すると、地すべりfとgの傾斜角は30°から35°であり、他の地すべりの傾斜角18°から30°よりやや急傾斜である。これは、層理面の傾斜方向と斜面の向きが大きく斜交することによると思われる。



Fig.11 Photographs of the earthquake-induced landslides in Area 3. (a) Landslide a. (b) Landslide b.

Source: Sediment Disaster Prevention Publicity Center. The date of each photograph is noted.

国土交通省によると、エリア2内では地震地すべり a, c, d, hにより4箇所天然ダムが形成されたが、2025年8月31日時点で残存しているのはhの1箇所のみである。

### 3.3 エリア3

地震地すべりの数は少ないものの、比高数10mの丘陵において地震地すべりが発生し、斜面下の住宅が被災した。

#### (1) 地質

Fig.10にエリア3の地質図と地質断面図を示す。デイサイト細粒火砕岩は西北西に約12°傾斜し、ゆるい流れ盤を形成している。その上位に安山岩溶岩塊を含む火砕岩、砂岩、礫岩が分布している。

#### (2) 地震地すべり

Fig.11に地震地すべりの写真を、Fig.12に、地震地すべりの推定断面図を示す。

安山岩火砕岩およびその碎屑物からなる堆積岩とデイサイト火砕岩との境界をなす北西向きのゆるい流れ盤斜面において、地震地すべりが発生し崩壊斜面下の複数の住宅が被災した。

崩壊面をなす前記境界面では、地下水の浸出が認められ、淡黄褐色の細粒デイサイト火砕岩は変質し、指で潰すと泥濁化し非常に滑りやすい性質を有していた。

この変質デイサイト火砕岩をXRDで分析した結果、ハロイサイトが検出された。また、境界の上盤をなす安山岩質火砕岩のXRD分析から、少量のハロイサイトとスメクタイトが検出された。

室内透水試験の結果、変質デイサイト火砕岩の透水係数として $1.2 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ が得られた。緩速せん断による一面せん断試験の結果、c,  $\phi$ としてそれぞれ、 $-0.091 \text{kPa}$ ,  $22.0^\circ$  が得られた。3軸圧縮試験(UU)を行

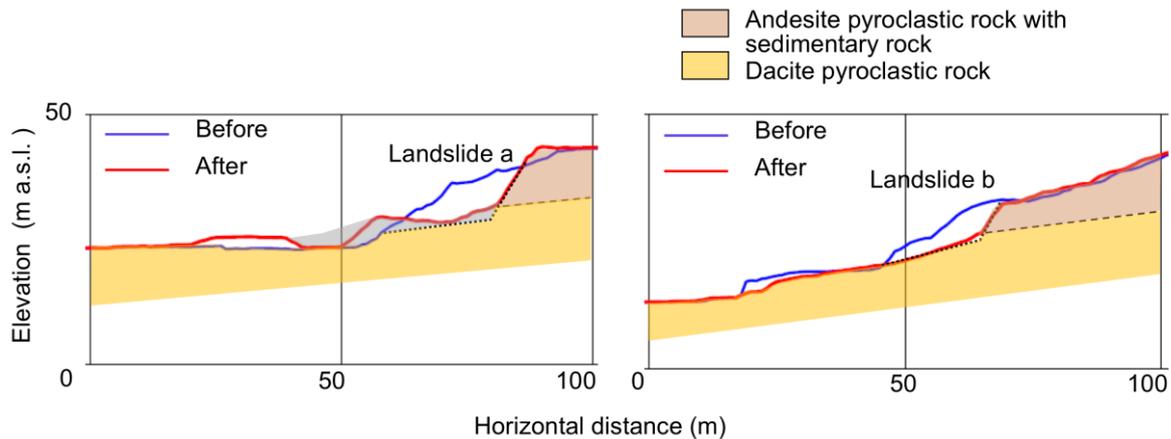


Fig.12 Geological cross-sections of the earthquake-induced landslides in Area3.

Table 1 Parameters used in the analysis and results

Item	Unit	a	b
Density	kg/m <sup>3</sup>	1600	1600
Cohesion	kPa	29.0	29.0
Internal friction angle	degree	1.4	1.4
Dynamic cohesion	kPa	34.8	34.8
Dynamic internal friction angle	degree	1.4	1.4
Correction coefficient of simplified Jambu's method.		1.10	1.09
Safety factor for non-seismic events		1.64	1.64
Horizontal acceleration when the safety factor during earthquake is 1.0.	gal	392	471

った結果、 $c$ 、 $\phi$ としてそれぞれ、29.0kN、1.4°が得られた。

簡易ヤンプ法により、3軸圧縮試験(UU)により得られた強度定数 $c$ 、 $\phi$ を用いて全応力法による2次元安定解析を行った。まず、地震荷重を作用させずに通常の安定計算を行い、次に震度法により水平方向に地震荷重を作用させて安定計算を行った。この場合の動的強度定数は、石原(1976)、長尾(1982)を参考として動的粘着力を静的強度の1.2倍とした。解析に用いた物性値をTable 1に示す。

解析の結果、地震荷重を作用させない場合の安全率は1.64で十分安定であり、392galから471gal以上の地震荷重が加わると安全率が1.0を下回る結果となった。エリア3から約4.4km東方にKiK-netの観測点ISKH05が丘陵地内に位置している。深度18mまでがVsが280m/sから600m/sで、18m以深がVs1550m/sの礫岩が分布している。この観測点の地表面で2024年能

登半島地震時に400galから800galの水平方向の加速度が記録されている。動的強度定数や作用させる地震荷重の値に不確定な部分があるが、2007年3月25日のM6.9や2023年5月5日のM6.5の能登半島地震では、対象斜面は安定性を維持していたので、2024年能登半島地震M7.6ではじめて限界の地震荷重が作用したと思われる。

## 4. 議論

### 4.1 震源断層からの距離と地震地すべり、亀裂密度との関係

Fig.13に、2024年能登半島地震の震源断層モデル(久保ら, 2024)のうち輪島市から珠州市の海岸線沿いの海底地震断層から平行に200m幅の短冊状の矩形域を設定し、各短冊内の地震地すべりの面積密度( $\Sigma$ 地震地すべりの面積/短冊の面積)と短冊内の亀裂長の総和を海底地震断層からの水平距離に対してプロットしたグラフを示す。地震地すべりとして、国土地理院が判読したポリゴンを使用し、亀裂データとして林野庁のデータを使用した。以上の分析にあたり、海域を除外し、陸域については平野部では地震地すべりは発生しえないので比高5m以上の面積比率を考慮して地すべりの密度や亀裂長の総和を補正した。

その結果、地震地すべりの発生密度は、ばらつきがあるものの震源断層から離れるほど低下し、26kmではほぼ収束する傾向にある。一方、亀裂長は11km付近にピークが認められ16km付近から急減しほぼ26kmで収束する傾向にある。

地震地すべりの発生密度や亀裂長の分布のばらつきは、断層破壊パターンに依存する部分、断層上盤の岩盤の地震波増幅特性、地震基盤から地表面までの地盤や地形による増幅特性が影響していると考えられる。前2者については、震源インバージョン解析

により推定可能と思われるが、後者については山地での地震観測や地震応答解析を併用する研究が望まれる。

## 4.2 崩壊形状の分析

エリア1と2で、2024年能登半島地震で発生した地震地すべり発生斜面を対象として、斜面の縦横断面形状、地すべりの縦横比、斜面内の地すべり発生位置、地すべりの移動方位、地すべりの体積と等価摩擦係数との関係を調べた。これらの図をFig.14からFig.18に示す。

### (1) 斜面の縦横断面形状

鈴木 (1997) は、斜面の縦横断面形状により、斜面形を9種類に分類した。エリア1ではRsの平面型、エリア2ではXrの凸型斜面が多い傾向がある。雨による地すべりでは集水地形を反映した凹型形状が多いことが指摘されているが、地震地すべりでは凸型や平面型が多い傾向が認められる。

### (2) 地すべりの縦横比

エリア1では、0.30から1.07までの様々な値をとるが平均すると0.57となる。エリア2では、地すべりhが1.23と横長の形状であるが、他の地すべりでは0.47前後の値をとり、縦長の形状が多い。

### (3) 斜面内の地すべり発生位置

尾根からの相対位置をA、斜面足元からの相対位置をBのパラメータで正規化している。

エリア1では、Aパラメータに着目すると、ややばらつきが大きく、1.0に近いものと、0.6前後の値をとるものがある。後者は、崩積土中の地すべりに対応しているものが多い。

エリア2では、Aパラメータは0.9から1.0の値をとるものが大部分で滑落崖が尾根付近に位置している。

### (4) 地すべりの移動方位

エリア1では、尾根に直交する北北西から北西向きの地すべりが多く、地すべりgのみ西南西を示す。

エリア2では、南東が多く、西や北北西を示すものも少数含まれる。これは、珪質シルト岩の層理の傾斜方向を反映していると思われる。

### (5) 地すべりの体積と等価摩擦係数との関係

既往研究と同様に、地すべりの体積が大きいほど等価摩擦係数は小さい傾向がある。

エリア1では地すべりgが0.28と他に比べて小さな値をとり、他の地すべりは0.45から0.81とばらつきが大きい。エリア2では、0.27から0.52の値をとり平均で0.38である。fとgがやや大きめの値をとるのは、Fig.8に示すようにすべり面が層理面に大きく斜交しているためと推定される。

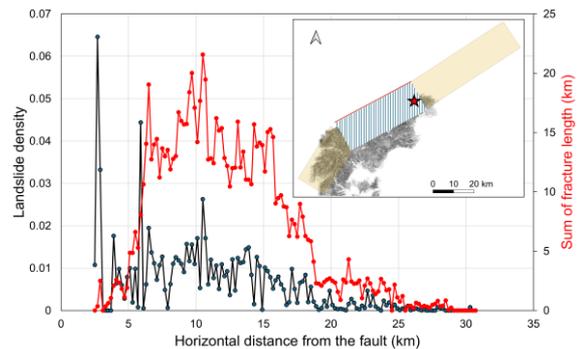


Fig.13 The earthquake-induced landslide density and the sum of the fracture length each 200 m swath from the earthquake source fault. A star mark is the location of the hypocenter, and the blue area shows the analysis domain.

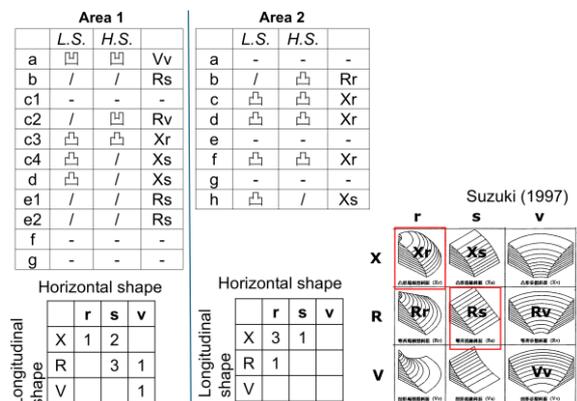


Fig.14 Shape of the slope where the earthquake-induced landslides occurred in Area 1 and 2.

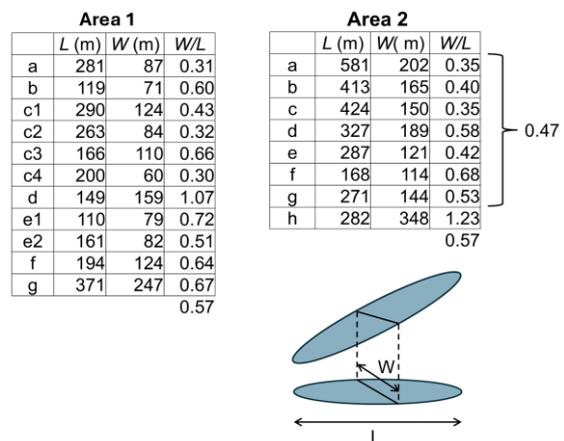


Fig.15 The shape of the earthquake-induced landslides in Area 1 and 2.

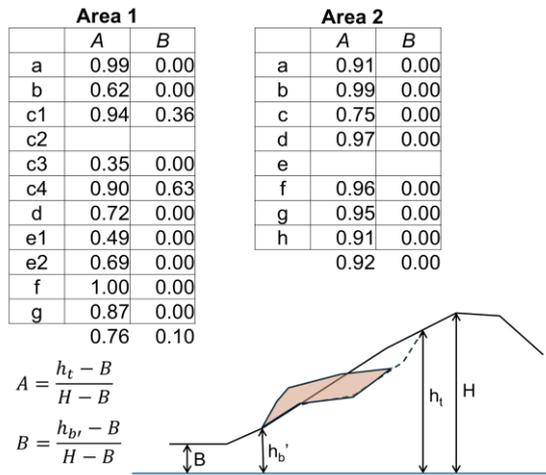


Fig.16 Relative position of earthquake-induced landslides on the longitudinal slope profile in Area 1 and 2.

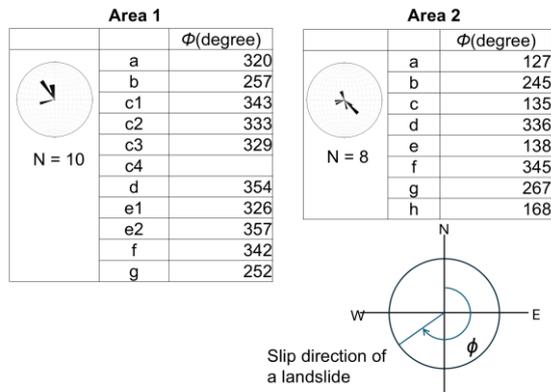


Fig.17 Slip direction of earthquake-induced landslides in Area 1 and 2.

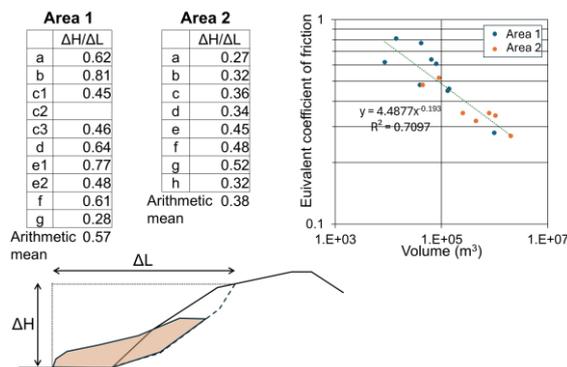


Fig.18 Equivalent coefficient of friction of the earthquake-induced landslides in Area 1 and 2.

### 4.3 2024年能登半島地震による地震地すべりの地質要因

以下に、地質毎にその地質要因を記す。

#### (1) 流紋岩火砕岩

海岸線沿いの比高が大きく急傾斜の斜面において、

割れ目沿いの岩盤崩壊、風化・変質火砕岩中の大規模な流れ盤地すべり、崩積土中のスランプ型地すべり、尾根沿いの落石、表層崩壊といった多様な地震地すべりが発生した。

吉川ら (2002) によると栗倉層の流紋岩質マグマの噴火活動中心が、町野町曾々木の岩倉山付近に位置し、東方に向かって層厚を減じるとともに細粒化していると報告している。阿部ら (2024) によると流紋岩溶岩の分布域では、落石や表層崩壊が発生したものの火砕岩分布域にくらべると地震地すべりの発生密度が相対的に小さかったとの指摘がある。

エリア1は、流紋岩火砕岩の分布域に相当し、比較的供給源に近く厚い火砕流堆積物と、火山碎屑物からなる細互層が南西から南東にゆるく傾斜し、地すべりaからfは受け盤をなし、gのみ流れ盤を構成する。

流紋岩質の火砕岩は、リバウンドハンマー反発度R0が20から30で、風化・変質作用を受けた場所では、ハンマーの軽打により容易に砕くことができ軟岩相当の岩盤強度を有する。

火砕岩中の軽石や細粒基質をXRDで分析した結果、沸石(モルデン沸石, 斜プチロル沸石)や一部にスメクタイトが含まれていた。おそらく海水中での噴火活動のため比較的低温の水中共火砕流が発生し、海水と火山ガラスが反応して沸石、スメクタイト等の変質鉱物が次第に形成されたものと思われる。

細互層部は火砕岩部に対して相対的に急斜面をなし、急崖を形成している。

海岸線沿いの岩盤中には、尾根と平行または斜交する高角開口割れ目が存在する。これらは、2024年およびそれ以前の地震により形成されたものかもしれない。地すべりbやfは、既存の割れ目を分離面として岩盤崩壊が発生したものと思われる。

地すべりgは、エリア1で発生した地震地すべりの中では、崩壊体積が98万m³と最大である。硬質な細互層を底面とし、風化・変質して強度が低下した流紋岩火砕岩が流れ盤斜面において地震地すべりを起こしたものと推定される。

#### (2) 珪質シルト岩

エリア2で調査したaからhの8箇所の地震地すべりの内、流れ盤を形成していたのは、fとgを除く6箇所であり、大部分が流れ盤斜面で発生していた。したがって、層理面は地震地すべりの第一級のすべり面を構成しやすい地質分離面といえる。

地すべりaでは、冠頭部に地すべり体を斜断する連続性のよい割れ目が存在し、割れ目沿いにはスメクタイトを含む赤褐色の粘土が形成されていた。地すべりcでは、連続性の良い高角割れ目が南側側方崖の一部を構成していた。地すべりdの冠頭部には、削痕

を伴う複数の節理面や、東側側方崖中に複数の珪質シルト岩の角礫を含むせん断層が観察された。これらの地質分離面も、層理面と組み合わさって流れ盤状のくさび体を形成し、地震地すべりのすべり面を構成していたと推定される。

地すべりcでは、海緑石砂岩層と上位の珪質シルト岩との境界面がすべり面の一部を構成していた。海緑石砂岩層は、未風化の状態では硬質で低透水性であるのに対して、上位の珪質シルト岩は、風化作用により微細なクラックが発達し、海緑石砂岩層上面に湧水が認められ、スメクタイトを含む粘土が形成されていた。珪質シルト岩中の凝灰岩層沿いに地震地すべりのすべり面が形成された露頭を確認していないが、その可能性も考えられる。

### (3) 変質したデイサイト火砕岩が流れ盤を形成している場合

エリア3では、デイサイト火砕岩が西北西に約12°傾斜し、ゆるい流れ盤を形成していた。崩壊した斜面下部では、火砕岩が変質してハロイサイトが形成されていた。上位の安山岩礫を含む火砕岩と変質したデイサイト火砕岩との境界からは、数箇所湧水が認められた。強震動によりハロイサイト層がせん断破壊されてすべり面液状化を起し、高速の地震地すべりが発生したと思われる。

2018年北海道胆振東部地震や2016年熊本地震では風化・変質作用により形成されたハロイサイトを含む降下火山灰層からなる斜面で、地震地すべりが群発した(Fukui, et al., 2024; Kameda, 2021; 佐藤ら, 2017)。千木良(2015)は、世界で発生した降下火砕物による地震地すべりの一覧表を示し、それらの大部分にハロイサイトが含まれることを指摘した。

地震地すべりが発生した地点は、低比高の丘陵地に位置し、宅地として利用されやすい土地条件を備えていた。安定解析の結果、通常の降雨や地震では、斜面は安定を保持していたが、ある閾値以上の強震動が作用した場合に急激な地震地すべりが発生して斜面災害に至ったものと推定される。

## 5. 結論

2024年能登半島地震で発生した、深さ5m以上の地震地すべりを対象として、それらの地質要因を調べるために地質調査とGIS解析を行い以下のことがわかった。

- ・流紋岩火砕岩からなる海岸線沿いの比高が大きく急傾斜の斜面において、割れ目沿いの岩盤崩壊、風化・変質火砕岩中の大規模な流れ盤地すべり、崩積土中のスランプ型地すべりといった多様な地震地すべりが発生した。

- ・珪質シルト岩かなる山地では、珪質シルト岩の層理面がゆるい流れ盤を形成し地震地すべりのすべり面となった。層理面と他の地質分離面の組み合わせによるくさび体が流れ盤を構成する場合も含まれる。

- ・穴水町では、変質してハロイサイトを含むデイサイト火砕岩がゆるい流れ盤を形成していた。強震動によりハロイサイト層がせん断破壊されてすべり面液状化を起し、高速の地震地すべりが発生した。

2024年能登半島地震では、多様な地震地すべりが発生しているが、本研究ではその一部について調査結果を示したものである。地震地すべりの地質要因、地形要因の全体像を明らかにするために今後もさらなる調査が必要である。

最後に、今回の災害で亡くなられた方々のご冥福をお祈りするとともに、被災された方々にお見舞い申し上げます。

## 謝 辞

本研究の実施にあたっては、京都大学防災研究所の自然災害研究協議会による災害調査支援および一般共同研究「令和6年能登半島地震災害の分析から地震時斜面災害の特徴とその前駆状態を解明する」(研究代表者：山崎新太郎)の助成を受けました。地震前のDTMは、石川県と朝日航洋株式会社から、地震後のDTMは、石川県、中日本航空株式会社、林野庁から提供を受けました。国土地理院のホームページより、令和6年能登半島地震や豪雨による地すべり分布図、空中写真、オルソ画像を利用しました。林野庁の亀裂データを利用しました。国際航業株式会社から斜め空中写真の利用許諾を得ました。松四雄騎教授と小暮哲也教授には一面せん断試験等を行うにあたり、便宜を図っていただきました。以上の方々に謝意を申し上げます。

## 参考文献

阿部朋弥・川畑大作・細井淳・宮地良典・斎藤 眞(2024) 第8報2024年能登半島地震に伴う斜面崩壊の崩壊箇所と地形・地質との関係(予察).産業技術研究所地質調査総合センター.  
石原研而(1976) 土質動力学の基礎, 鹿島出版会, p.303.  
久保久彦・鈴木亘・青井真・関口春子(2024) 強震波形記録を用いた令和6年(2024年)能登半島地震(1月1日16時10分, M7.6)の震源インバージョン解析.

- 国土地理院 (2024) 令和6年(2024)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).
- G空間情報センター (2024) 令和6年能登半島地震関連データポータル, <https://www.geospatial.jp/ckan/dataset/rinya-noto-portal>.
- 佐藤達樹・千木良雅弘・松四雄騎 (2017) 2016年熊本地震により発生した阿蘇カルデラ西部における斜面崩壊の地形・地質的特徴, 京都大学防災研年報, Vol.60(B), pp.431-452.
- 鈴木隆介 (1997) 建設技術者のための地形図読図入門第一巻 読図の基礎, 古今書院, p.122.
- 千木良雅弘 (2015) 近年の地震による急激な地すべりから学ぶもの, 日本地すべり学会誌, Vol.52(2), pp.93-98.
- 長尾哲 (1982) 斜面の土の動的強度と安定解析(その3), 地すべり技術, Vol.9, No.2, pp.6-9.
- 日本地すべり学会. (2012) 地震地すべり, p.302.
- 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) .
- Fukui, H., Matsushi, Y., Watanabe, T., Lyu, H., Kitao, S., Kobayashi, Y. and Shinoda, K. (2024): Redox-controlled differential weathering of andesitic pumice: Possible catalytic effects of ferrous/ferric iron on rapid halloysite accumulation in a Holocene tephra layer, CATENA, Vol.235, 107685.
- Ishida, S. (1959): The Cenozoic Strata of Noto, Japan, Memoirs of the College of Science, University of Kyoto, Series B.26(2), pp.83-101.
- Kameda J. (2021): Mineralogical and physico-chemical properties of halloysite-bearing slip surface material from a landslide during the 2018 Eastern Iburi earthquake, Hokkaido, Progress in Earth and Planetary Science, Vol.8(1), 37.

# Post-Flood Survey and Hazard Mapping of the Cagayan River Basin: An Integrated RRI Modeling and Community-Based Approach

Sameh A. Kantoush\*, Jerome Gacu\*\*, Sarah Alma Bentir\*\*\*, Mohamed Saber\*, Binh Quang Nguyen\*\*\*\*, and Czarimah Singson-Valdez\*\*\*\*\*

\* Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho, Uji, Kyoto 611-0011, Japan

\*\* Department of Civil Engineering, College of Engineering and Technology, Romblon State University, Liwanag, Odiongan, Romblon 5505, Philippines

\*\*\*College of Information and Communication Technology, Bulacan State University- Sarmiento Campus, San Jose Del Monte Bulacan, 3023, Philippines

\*\*\*\*Faculty of Water Resources Engineering, The University of Danang-University of Science and Technology, Da Nang 550000, Vietnam

\*\*\*\*\*College of Engineering, Isabela State University, Purok 06, Echague, Isabela, Philippines

## Abstract

Floods remain among the most destructive natural hazards in the Philippines, particularly in the Cagayan River Basin (CRB), the country's largest river system and a critical agricultural hub. This study presents an integrated framework for flood hazard assessment by combining two-dimensional Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) modeling with field validation and community-based insights. The model was calibrated and validated using 60 georeferenced flood marks collected during a post-event survey in January 2025, showing good agreement with observed depths ( $R^2 = 0.666$ ). The simulation results were classified into five hazard categories to produce a comprehensive flood hazard map, indicating that 29.32% of the basin falls under high to very high hazard levels ( $\geq 3$  m depth), especially along the Cagayan River and its tributaries. These findings identify critical flood-prone areas affecting settlements, bridges, and agricultural zones. By integrating ground-truth data and local knowledge, the study ensures both technical reliability and contextual relevance, providing an evidence-based tool for disaster preparedness, land-use planning, and climate resilience. While limitations remain—such as restricted field access and coarse-resolution topography in urban areas—future research should incorporate LiDAR data, expand validation coverage, and integrate real-time rainfall forecasts with AI-driven analytics to enhance predictive capacity. Overall, the study demonstrates a scalable and adaptive approach for flood risk management in data-limited environments, with direct implications for policy and community resilience in the Philippines.

## 1. Introduction

Floods are among the most common and destructive natural disasters, causing widespread damage to life, infrastructure, and livelihoods [19]. In the Philippines, frequent typhoons and intense rainfall often trigger severe flooding. These events are worsened by climate change, deforestation, poor land use, and limited drainage systems. As flood risks continue

to grow, understanding their impacts through post-flood assessments is crucial for improving response, recovery, and future risk reduction efforts.

In 2024, the Philippines ranked as the most disaster-prone country in the world for the third consecutive year, with a World Risk Index (WRI) score of 46.91 [6]. Its location along the Pacific Ring of Fire makes it highly susceptible to

natural hazards. Within this context, the Cagayan River Basin (CRB), the country's largest river basin covering approximately 27,300 km<sup>2</sup>, faces increasing environmental and socio-economic threats. Frequent typhoons, such as Typhoon Vamco (Ulysses) in 2020, have caused severe flooding, with water levels reaching up to 4.5 meters and displacing thousands [13]. Sediment-laden rivers, over-saturated soils, poor dam management, and rapid land degradation worsen these floods. Riverbank erosion, channel migration, and sedimentation-driven by deforestation, unregulated farming, and settlement in flood-prone areas have reduced the river system's capacity to manage runoff [7, 8, 21]. Climate change intensifies these risks through erratic rainfall and stronger storms [5]. Additionally, over 200,000 hectares of irrigable land remain underutilized due to poor infrastructure and a lack of integrated watershed management [3]. As a result, the CRB is experiencing declining water quality, reduced agricultural productivity, and worsening flood vulnerability, threatening both ecosystems and

regional food security.

Existing flood hazard mapping efforts in the Philippines have relied mainly on traditional techniques such as the Analytical Hierarchy Process (AHP), Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) [12, 16, 22], and static GIS-based overlays, which, while useful at the local level, fall short in capturing the hydrological complexity and dynamic interactions present in large-scale basins like the CRB [1, 3]. These conventional approaches often lack the spatial-temporal resolution, predictive capabilities, and adaptability required for effective flood risk reduction in data-scarce and hazard-prone environments. More advanced hydrological modeling tools have been proven effective in simulating hydrological behavior, sediment transport, and dam operations under various climate and land-use change scenarios [3, 14]. Incorporating such tools, supported by remote sensing and high-resolution terrain data, offers a more scalable, dynamic, and accurate framework for flood hazard mapping and risk-informed decision-making at the basin level [2].

The Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model is a two-dimensional distributed hydrologic and hydraulic model developed for simulating surface runoff and flood inundation across large and complex river basins [15, 18, 24]. It has been widely adopted due to its ability to integrate spatially distributed data such as rainfall, land use, soil characteristics, and topography, making it particularly effective for flood hazard mapping in data-limited regions like the Philippines [4, 24]. Unlike conventional models, RRI allows simultaneous computation of runoff generation and flood propagation in both slope and channel domains, enabling more accurate inundation prediction [24]. Its application in recent studies has demonstrated reliable performance in simulating typhoon-induced flood events and assessing the impacts of land use and climate change on basin-wide flood risks [3, 14]. Given these advantages, RRI serves as a valuable tool for integrated flood risk management and early warning systems in vulnerable regions. Post-flood surveys play a pivotal role in enhancing disaster risk management and resilience-building strategies by providing firsthand insights into the geomorphic, infrastructural, and socio-economic impacts of flood events. As highlighted in the survey of the 2015 flash flood in Southern Italy, field-based mapping revealed localized erosion, sediment deposition, and damage to agricultural economies, underscoring the importance of rapid on-ground assessments to understand hazard dynamics and support mitigation planning [23]. Moreover, post-flood assessments contribute to evaluating the effectiveness of early warning systems, identifying spatial disparities in recovery (e.g., through Earth Observation), and informing equitable and adaptive policy interventions [11]. Such surveys also integrate community experiences, enabling the capture of localized vulnerabilities, place attachment, and risk perception, which are critical for planning sustainable recovery and relocation efforts [9, 10]. Beyond immediate impact documentation, they guide the design of reconstruction programs, improve flood modeling calibration, and serve as evidence for future flood preparedness and policy dialogues [17, 25].

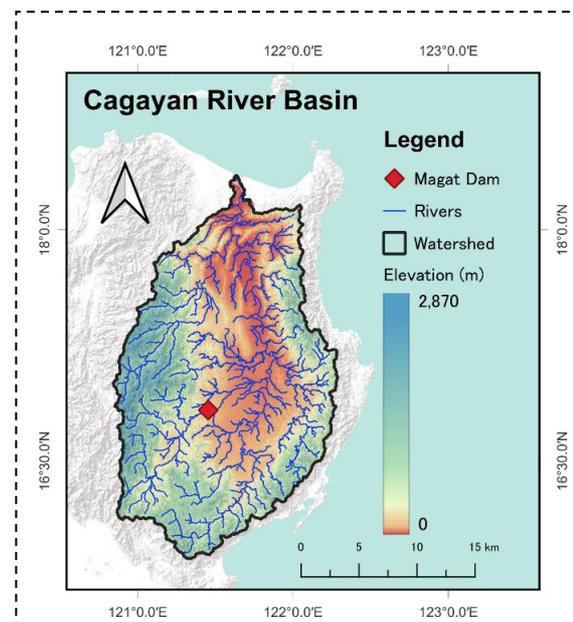


Figure-1 Map of the Cagayan River Basin (CRB), showing the river network, watershed boundary, elevation distribution, and the location of Magat Dam.

While recent advancements in flood modeling have improved hazard prediction, a significant gap remains in studies that integrate two-dimensional RRI modeling with field-based observations and community-level data. Most existing research tends to rely solely on remote sensing or hydrological simulations, often overlooking localized insights and ground-truth validation. This study addresses that gap by combining scientific modeling with data from field surveys and inputs from residents, offering a more comprehensive and context-sensitive approach to flood hazard mapping in the CRB. By merging technical precision with community-based knowledge, the research enhances the relevance and applicability of flood risk assessments for both decision-makers and vulnerable populations.

This study aims to develop a comprehensive flood hazard map for the CRB using two-dimensional RRI modeling. It also seeks to incorporate field survey data and community insights to validate and refine the model outputs, ensuring their relevance to local conditions. Ultimately, the study intends to generate practical recommendations that can inform flood risk management strategies and guide policy development for more resilient and adaptive

responses to flooding in the region.

## 2. Methods

### 2.1 Study Area

The Cagayan River Basin (CRB), the largest river basin in the Philippines [20], is highly vulnerable to flooding due to its topography, extensive river systems, and land use patterns (shown in Figure 1). It plays a vital role in regional food security, supporting vast agricultural activities across Cagayan, Isabela, and Quirino provinces. In 2024, the Philippines was hit by multiple typhoons, with the CRB among the hardest-hit areas. Peak activity occurred in September and November, with September alone seeing three typhoons and two tropical storms. Rapid succession of storms, including Typhoons Trami and Leon, led to saturated soil and swollen rivers, increasing flood risks. Typhoon tracks revealed a widespread impact, underscoring the country's vulnerability to tropical cyclones. In response, authorities issued dam release warnings near Magat Dam to prevent overflow, but downstream flooding still occurred.

The CRB is a key agricultural hub essential for regional food security, but it is highly prone to flooding. Its topography, river systems, and land use patterns contribute to frequent inundation, especially during typhoons. The 2020 Typhoon Ulysses severely affected Cagayan, Isabela, and

Quirino, damaging crops, livestock, and infrastructure [13]. Over 250,000 families and nearly 900,000 individuals were impacted. Around 14% of the basin is flood-prone, including both residential and commercial zones, underscoring the basin's vulnerability and the need for targeted flood risk management.

### 2.2 Field Survey and Public Contributions

Field surveys were conducted in strategically selected flood-prone barangays within the CRB to collect essential qualitative and quantitative data related to recent flood events. Prior to the survey, proposed sites were identified based on historical flood reports, proximity to river systems, and community vulnerability, ensuring comprehensive spatial coverage across the basin. Several survey points (refer to Table 1 and Figure 2) within the CRB were strategically selected to document the impacts of the 2024 typhoon events, including key infrastructures such as schools, bridges, and local outposts. Before-and-after photographs illustrate the severity of flooding across various locations, providing visual evidence of inundation depth and damage. These images, initially sourced from publicly available social media platforms, were verified through Google Maps Street View and GPS-based field validation. The integration of visual documentation with spatial mapping strengthened

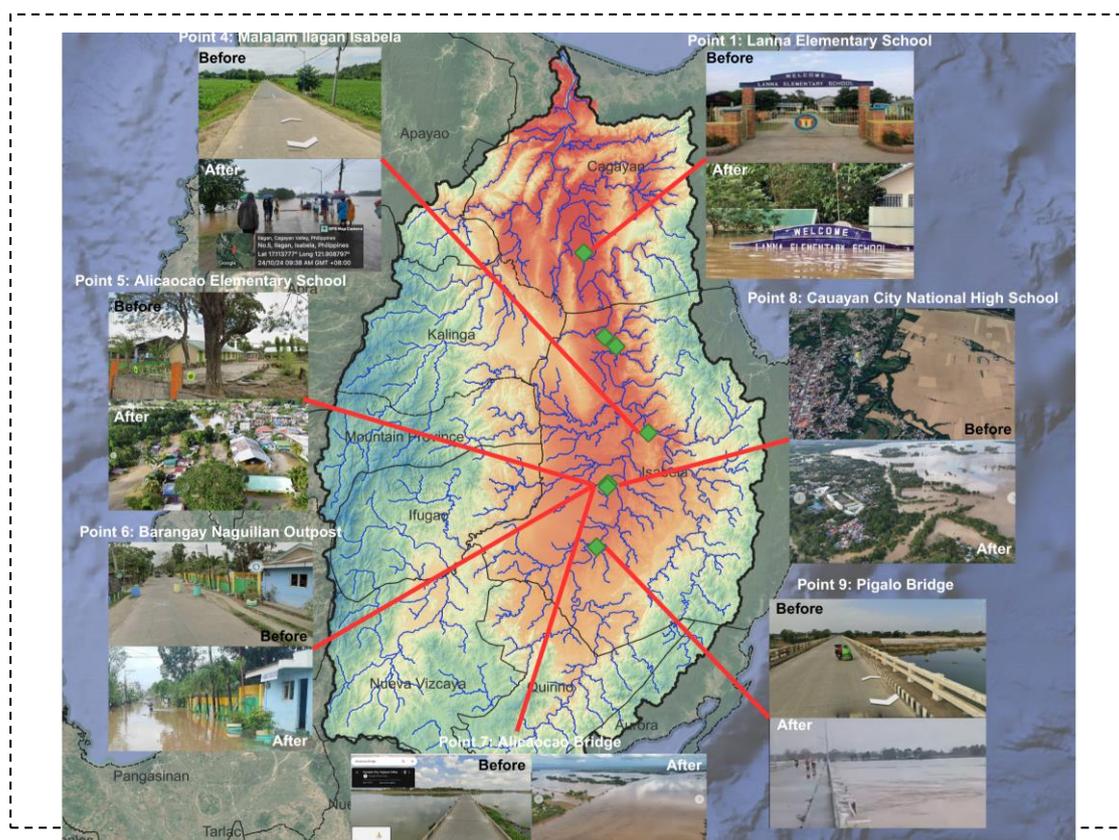


Fig. 2. Map of the Cagayan River Basin (CRB) highlighting “before” and “after” photographs taken during field visits. Sites include schools, bridges, and barangay outposts that experienced significant inundation during the 2024 typhoon events.

Table 1 Summary of proposed field survey sites in the Cagayan River Basin showing location coordinates, estimated flood heights, and observation dates recorded after major typhoon events in late 2024

Point	Name of Site	Latitude	Longitude	Estimated Flood Height	Date Captured
1	Lanna Elementary School	17.6942	121.7029	2	14-Nov-24
2	Cagayan Valley	17.4233	121.7693	1	14-Dec-24
3	Cansan Cabagan Isabela	17.3925	121.8058	1	14-Dec-24
4	Malalam Ilagan Isabela	17.1138	121.9088	0.8	24-Oct-24
5	Alicaocao Elementary School	16.9487	121.7782	1	18-Nov-24
6	Barangay Naguilian Outpost	16.9487	121.7783	1	18-Nov-24
7	Alicaocao Bridge	16.949	121.7814	1	18-Nov-24
8	Cauayan City National High School	16.9398	121.7777	0.4	18-Nov-24
9	Pigalo Bridge	16.7457	121.7435	2	18-Nov-24

the reliability of ground-truth data used for model calibration and hazard analysis.

The flood survey was carried out in January 2025, just months after a series of strong typhoons severely impacted the CRB, providing timely and relevant insights into recent flood impacts. The survey methodology included structured interviews with residents, documentation of flood marks on structures, in-situ measurements of flood depths, and geotagged photographs. Additionally, key informant interviews with municipal officials and focused group discussions provided valuable insights into flood behavior, evacuation responses, and the community's coping strategies. These data were validated using GPS-based location checks and integrated into a spatial database. The collected field information served as critical ground-truth input for calibrating and validating the RRI model, enhancing its ability to simulate real flood extents and depths under various rainfall scenarios. This integration of local observations into scientific modeling ensures that the flood hazard maps produced are both technically robust and contextually grounded.

### 2.3 RRI Modeling

The RRI model, a two-dimensional distributed hydrologic and hydraulic simulation tool, was employed to analyze and predict flood behavior across the CRB. This model is specifically designed to simulate the complex interaction between rainfall input, surface runoff

generation, and flood inundation dynamics, making it suitable for large-scale basins like the CRB. For this study, several key data sets were prepared and integrated into the RRI modeling framework.

Rainfall input was obtained from the National Irrigation Administration - Magat River Integrated Irrigation System (NIA-MARIIS), which provided reliable temporal precipitation data essential for simulating event-based flood scenarios. Topographic data were derived from a high-resolution Digital Elevation Model (DEM), enabling detailed terrain analysis that guided the flow direction, slope, and accumulation pathways of surface runoff. Land use and land cover (LULC) data were sourced from the Food and Agriculture Organization (FAO), which provided information on surface roughness and infiltration capacity across different land types. Additionally, soil type data were incorporated to enhance the model's estimation of infiltration and runoff behavior, while river network data defined the drainage pathways within the basin.

The model was validated using observed flood marks, measured depths, and community-reported flood extents gathered during the January 2025 field survey. This validation ensured that the simulation outputs closely reflected real flood events. Final outputs of the RRI model included spatially distributed flood hazard maps showing inundation extent and depth for different rainfall scenarios. These maps served as a vital

decision-support tool for flood risk assessment, emergency planning, and disaster mitigation efforts across the CRB.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 Field Observations

Field validation was conducted in January 2025 across strategically selected flood-prone areas in the CRB. The survey covered 60 proposed points, prioritized based on historical flood records, community vulnerability, and proximity to major river channels. However, due to accessibility constraints, such as impassable roads and isolated locations, data collection focused on sites that could be reached safely and within the available timeframe.

Survey activities involved community consultations, key informant interviews, and physical validation of flood marks on structures to document inundation depths. Residents provided qualitative insights into flood behavior, timing of peak inundation, and evacuation practices, which complemented the measured quantitative data. Geotagged photographs and GPS-based validation were carried out at each accessible site, while selected locations were further cross-checked

using Google Street View and pre- and post-event



Figure-3 Field survey activities conducted in the CRB: (a) community consultation through local interviews, (b) key informant discussion with municipal officials, (c) identification of flood marks on residential structures, and (d) in-situ measurement of recorded flood depths.

imagery. Figure 3 illustrates representative field activities, including (a) community consultations, (b) discussions with municipal officials, (c) on-site identification of flood marks on residential walls, and (d) in-situ flood

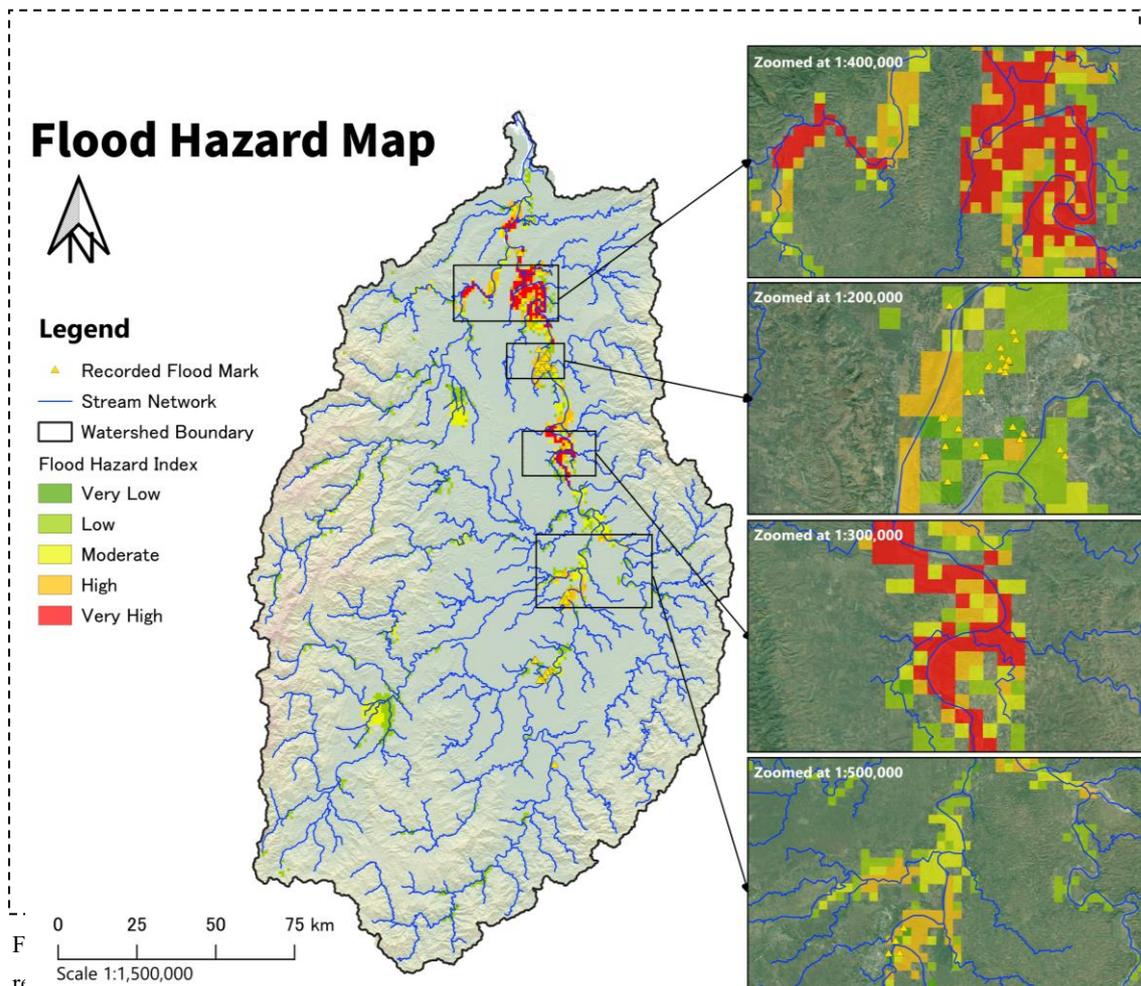


Table 2 Flood hazard classification and percentage of total flooded area for Cagayan River Basin.

Hazard Level	Depth Range (m)	% of Total Flooded Area
Very Low	< 1	0.65%
Low	1–2	44.76%
Moderate	2–3	25.27%
High	3–4	15.72%
Very High	> 4	13.60%

depth measurements. These validation efforts ensured that the resulting hazard maps are not only technically robust but also grounded in local realities, enhancing their reliability for decision-making and flood risk reduction planning.

### 3.2 Spatial Distribution of Flood Hazards

The RRI model was executed for the CRB to simulate flood inundation during the 2024 typhoon events. Model calibration and validation were conducted using 60 field-verified flood points, ensuring a reliable alignment between simulated flood depths and observed conditions. These ground-truth points, collected during the January 2025 field survey, provided critical reference data for fine-tuning model parameters related to roughness, infiltration, and storage dynamics.

The validated simulation outputs were classified into five hazard categories—Very Low (<1 m), Low (1-2 m), Moderate (2-3 m), High (3-4 m), and Very High (>4 m)—to generate the basin-wide flood hazard map shown in Figure 4. The spatial pattern reveals significant inundation along the main Cagayan River channel and its major tributaries, where settlements and agricultural lands are concentrated.

Based on Table 2, approximately 44.76% of the affected areas fall under the Low Hazard category (1-2 m), predominantly located in mid-basin agricultural zones. Moderate hazard levels (2-3 m) account for 25.27%, while High and Very High hazard zones collectively represent 29.32%, concentrated in floodplains and confluence regions near Tuguegarao City and downstream of Magat Dam. These findings emphasize that while

widespread shallow flooding occurs across the basin, localized extreme inundation poses severe risks to infrastructure and livelihoods.

To assess the accuracy of the flood hazard map, simulated flood depths from the RRI model were compared against 60 observed flood marks collected during the January 2025 field survey. These ground-truth points were distributed across multiple barangays in flood-prone zones of the CRB, focusing on schools, bridges, and residential structures that recorded significant inundations during the 2024 typhoon events.

The scatter plot in Figure 5 illustrates the relationship between observed and simulated flood depths. The validation yielded a coefficient of determination ( $R^2 = 0.666$ ), indicating a strong correlation between modeled and observed values. Most points cluster near the 1:1 reference line, confirming the model's capability to replicate flood depth variability across different locations. Minor discrepancies, particularly underestimation in urban areas, can be attributed to coarse DEM resolution and simplified representation of drainage infrastructure. This validation confirms the reliability of the RRI-generated hazard map for decision-making applications, particularly in

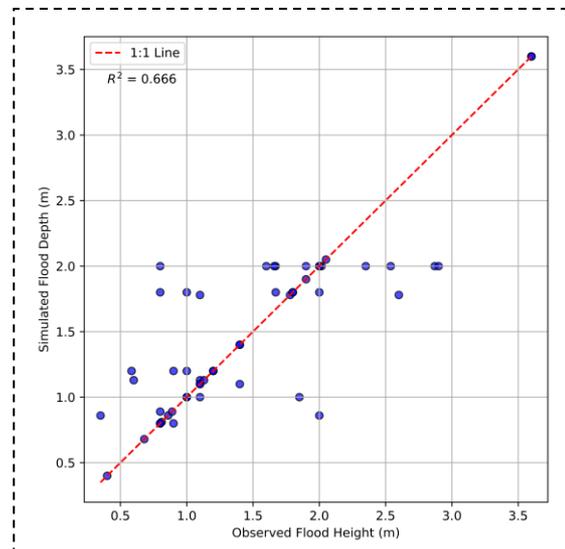


Figure-5 Validation of RRI-simulated flood depths against observed flood heights at 60 field survey points in the Cagayan River Basin. The 1:1 reference line indicates perfect agreement, while  $R^2 = 0.666$  demonstrates strong correlation.

identifying high-risk zones and guiding flood risk reduction strategies.

This study demonstrates the effectiveness of integrating 2D RRI hydrodynamic modeling with extensive field-based validation and community insights to produce a robust flood hazard assessment for the Cagayan River Basin. Unlike conventional GIS-based hazard mapping methods (AHP or MCDA) that often fail to capture dynamic flood processes, the RRI model simulates rainfall-runoff-inundation interactions across slopes and channels, resulting in spatially explicit predictions of flood depth. Validation against 60 field-observed flood marks achieved a strong correlation ( $R^2 = 0.666$ ), underscoring the model's capability to replicate real-world flood conditions. These findings confirm that integrating remote-sensing-based datasets with ground-truth measurements significantly improves accuracy and relevance, even in data-limited environments like the Philippines.

Despite these strengths, some limitations were identified that provide opportunities for improvement. The validation dataset, although comprehensive, was limited by accessibility issues and logistical challenges, which prevented coverage of all high-risk areas. Future studies should expand the number of ground validation points and integrate high-resolution topographic data (e.g., LiDAR) to reduce uncertainties in narrow floodplains and urbanized areas. Additionally, coupling the RRI model with real-time rainfall forecasts, advanced satellite products, and hydrodynamic dam operation modules could enhance simulation accuracy and operational utility. Integrating drone-based inundation mapping and AI-driven predictive analytics may further support real-time flood forecasting and early warning systems. These improvements will strengthen the scalability and reliability of the framework for application across other major river basins in the Philippines and beyond.

Beyond technical rigor, this research advances an integrated flood risk assessment framework that combines scientific modeling with local knowledge and socio-economic context, ensuring outputs are actionable for policy and practice. The generated hazard maps highlight critical inundation hotspots near major river channels and agricultural zones, providing essential input

for land-use planning, infrastructure resilience, and disaster preparedness. These results support evidence-based decision-making for flood risk reduction, aligning with global resilience agendas and offering a scalable approach for other flood-prone regions facing similar climatic and geographic challenges.

#### 4 Conclusion

This study developed a comprehensive flood hazard map for the CRB by integrating two-dimensional RRI modeling with field-based validation and community insights. The model, calibrated and validated using 60 georeferenced flood points, achieved strong agreement. Results revealed that nearly 30% of the basin falls under high to very high hazard categories, posing significant risks to critical infrastructure and agricultural zones. While the approach demonstrates robust technical accuracy and contextual relevance, future improvements should focus on expanding validation coverage, incorporating high-resolution LiDAR data, and integrating real-time forecasting and AI-based analytics to enhance predictive capacity. These findings offer actionable insights for land-use planning, dam operation strategies, and community-based DRR, providing a scalable framework for other flood-prone regions in the Philippines and beyond.

#### Acknowledgments

This research was supported by the Research Council for Natural Disasters and the Japan Science and Technology Agency (JST) under the NEXUS Program, Grant Number JPMJNX24A2. The authors gratefully acknowledge the support of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, as well as the cooperation of Isabela State University in the Philippines..

#### Bibliography

- [1] Alfonso, C.D.Q. u. a. (2019): Flood risk assessment of major river basins in the Philippines. *Int. J. GEOMATE*. Vol. 17, Nr. 64, S. 201–208.
- [2] Arrighi, C. u. a. (2018): Quantification of flood risk mitigation benefits: A building-scale damage assessment through the RASOR platform. *J. Environ. Manage.* Vol. 207, S. 92–104.
- [3] Balderama, O. u. a. (2024): Stakeholders' Forum

- on Integrated Flood Risk Management in Cagayan River Basin: Basis in Writing Policy Recommendations. *J. Environ. Agric. Stud.* Vol. 5, Nr. 2, S. 31–40.
- [4] Bhagabati, S.S., Kawasaki, A. (2017): Consideration of the rainfall-runoff-inundation (RRI) model for flood mapping in a deltaic area of myanmar. *Hydrol. Res. Lett.* Vol. 11, Nr. 3, S. 155–160.
- [5] Bharambe, K.P. u. a. (2023): Climate change impacts on spatiotemporal variation of extreme weather and its consequences on dam optimisation and risk management in the Cagayan basin, Philippines. *APN Sci. Bull.* Vol. 13, Nr. 1, S. 208–223.
- [6] Bündnis Entwicklung Hilft / IFHV (2024): *WorldRiskReport 2024*.
- [7] Cabansag, M.G.S. (2016): Characterizing the Water Quality of the Cagayan River: Basis for Community Action Programs Toward Prevention of Water Pollution. Vol. III, Nr. 1, S. 17–27.
- [8] Dingle, E.H. u. a. (2019): Decadal-scale morphological adjustment of a lowland tropical river. *Geomorphology.* Vol. 333, S. 30–42.
- [9] Dinh, N.C., Ubukata, F., Tan, N.Q., Ha, V.H. (2021): How do social connections accelerate post-flood recovery? Insights from a survey of rural households in central Vietnam. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* Vol. 61, Nr. March, S. 102342.
- [10] Fattah Hulio, A., Varghese, V., Chikaraishi, M. (2023): Analyzing the preferences of flood victims on post flood public houses (PFPH): Application of a hybrid choice model to the floodplains of southern Pakistan. *Clim. Risk Manag.* Vol. 42, S. 100571.
- [11] Friedrich, H.K. u. a. (2024): Earth Observation to Address Inequities in Post-Flood Recovery. *Earth's Futur.* Vol. 12, Nr. 2, S. 1–11.
- [12] Gacu, J.G., Monjardin, C.E.F., Senoro, D.B., Tan, F.J. (2022): Flood Risk Assessment Using GIS-Based Analytical Hierarchy Process in the Municipality of Odiongan, Romblon, Philippines. *Appl. Sci.* Vol. 12, Nr. 19,.
- [13] Macalalad, R. V. u. a. (2023): Role of Historical Warming on the Extreme Flooding Event Due to Typhoon Vamco (Ulysses) 2020 in the Philippines. *Philipp. J. Sci.* Vol. 152, Nr. S1, S. 197–212.
- [14] Mata, C.B. u. a. (2022): Satellite-Based Flood Inundation and Damage Assessment. *J. Robot. Autom. Res.* Vol. 3, Nr. 2,.
- [15] Momoi, M. u. a. (2023): Emulating Rainfall-Runoff-Inundation Model using Deep Neural Network with Dimensionality Reduction. *Artif. Intell. Earth Syst. S.* 1–25.
- [16] Morales, F.F., de Vries, W.T. (2021): Establishment of Natural Hazards Mapping Criteria Using Analytic Hierarchy Process (AHP). *Front. Sustain.* Vol. 2, Nr. May, S. 1–13.
- [17] Munawar, H.S. u. a. (2021): Post-Flood Risk Management and Resilience Building Practices: A case study.
- [18] Nastiti, K.D., Kim, Y., Jung, K., An, H. (2015): The application of Rainfall-Runoff-Inundation (RRI) model for inundation case in upper Citarum Watershed, West Java-Indonesia. *Procedia Eng.* Vol. 125, S. 166–172.
- [19] Nearing, G. u. a. (2024): Global prediction of extreme floods in ungauged watersheds. *Nature.* Vol. 627, Nr. 8004, S. 559–563.
- [20] Principe, J., Blanco, A. (2013): Swat Model for Assessment of Climate Change and Land Use/Land Cover Change Impact on Philippine Soil Loss and Exploration of Land Cover-Based Mitigation Measures: Case of Cagayan River Basin. *ASEAN Eng. J.* Vol. 3, Nr. 2, S. 83–104.
- [21] Principe, J.A., Blanco, A.C. (2012): Climate Change Impact Assessment on Soil Loss Rate in a Large River Basin Using SWAT Model , RS and GIS. S. 1–20.
- [22] Rubio, C.J., Yu, I.S., Kim, H.Y., Jeong, S.M. (2020): Index-based flood risk assessment for Metro Manila. *Water Sci. Technol. Water Supply.* Vol. 20, Nr. 3, S. 851–859.
- [23] Santo, A., Santangelo, N., Forte, G., De Falco, M. (2016): Post flash flood survey: The 14th and 15th october 2015 event in the paupisi-Solopaca area. *J. Maps.* Vol. 13, Nr. 2, S. 19–25.
- [24] Sayama, T., Iwami, Y. (2016): Rainfall-runoff and flood inundation predictions using RRI model.
- [25] Whitehurst, D., Joshi, K., Kochersberger, K., Weeks, J. (2022): Post-Flood Analysis for Damage and Restoration Assessment Using Drone Imagery. *Remote Sens.* Vol. 14, Nr. 19, S. 1–17.



第 62 回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集

2025 年 10 月 8 日

発行：京都大学防災研究所 自然災害研究協議会

議長：大湊 隆雄（東京大学地震研究所）

王 功輝（京都大学防災研究所・自然災害研究協議会総務）

（お問い合わせ）電話：0774-38-4347

<http://www.dpri.kyoto-u.ac.jp/ndic/contents.html>