# 第 61 回自然災害科学総合シンポジウム

(2024 年度防災研究所 重点推進型共同研究)

## 講演論文集

2024年9月21日(土)

主催

京都大学防災研究所 自然災害研究協議会

## 第61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

共 催: 千葉大学

日程: 2024年9月21日(土)終日(9時30分~13時00分予定)

場 所: 千葉大学西千葉キャンパスけやき会館大ホール ハイブリッド開催

プログラム

開会挨拶 自然災害研究協議会議長 池田 芳樹(京都大学防災研究所)

所長挨拶 堀 智晴(京都大学防災研究所)

9:40~10:15

【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5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1

平松 良浩(金沢大学)

10:15~10:50

【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5年度報告】

「2023 年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査結果」

楠浩一(東京大学地震研究所)

10:50~11:15

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

「2023 年能登半島沖の地震で発生した地震動と建物被害の対応」

汐満 将史(山形大学工学部)

11:15~11:25 休憩

11:25~11:50

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

「リビアの EI-Bilad Dam and Abu Mansour ダム決壊洪水に関する災害後緊急調査」

角 哲也(京都大学防災研究所)

11:50~12:15

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

「2024 年能登半島地震の建物被害調査と発生した地震動の破壊力の検証」

中澤 駿佑(宇都宮大学地域デザイン科学部)

12:15~12:40

【防災研究所共同研究·地域防災実践型共同研究】

「カラー化された過去の災害写真を用いた防災教育の実践とその効果の検討」

朝位 孝二(山口大学大学院創成科学研究科)

【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 5 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」	i
その11	
平松 良浩(金沢大学	(ځ
【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 5 年度報告】	
■「2023 年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査結果」・・・・・・・・・・・・・17	
楠 浩一(東京大学地震研究所	Ť)
【自然災害研究協議会突発災害調査報告】	
■2023 年能登半島沖の地震で発生した地震動と建物被害の対応······35	<b>.</b>
沙满 将史(山形大学工学部 	<b>(3</b> )
【自然災害研究協議会突発災害調査報告】	
■リビアの Derna (EI-Bilad) and Abu Mansour ダム決壊洪水に関する災害後緊急調査	
■ 7 C 7 O7 Del Ha (ET Di Fau) and Abu mansour アム人塚八小に関する火日夜系心明且41	
	듀)
万 百已 (水配入于树入明)(1)	17
【自然災害研究協議会突発災害調査報告】	
■「2024 年能登半島地震の建物被害調査と発生した地震動の破壊力の検証」······47	
中澤・駿佑(宇都宮大学地域デザイン科学部	ß)
【防災研究所共同研究・地域防災実践型共同研究】	
■「カラー化された過去の災害写真を用いた防災教育の実践とその効果の検討」 57	
朝位 孝二(山口大学大学院創成科学研究科	‡)

## 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

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>
- ·宮崎真一7·後藤忠徳8·笠谷貴史9·吉村令慧5·田中愛幸10
- ・宮澤理稔<sup>5</sup>・荒木英一郎<sup>11</sup>・森下知晃<sup>1</sup>・鹿児島渉悟<sup>12</sup>・石山達也<sup>2</sup>
  - ・立石 良13・安江健一13・廣内大助14・松多信尚15・宍倉正展16
  - ・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21・田中純一22・井口克郎23・佐々木大輔24・原 裕太24
- ・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29・石瀬素子30・古谷 元31・小林俊一1・高原利幸32
- ・金澤伸一33・保坂吉則33・王 功輝5・ト部厚志34・片岡香子34
- ・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>・楳田真也<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>
    - ・多々納裕一5・梶谷義雄41・中山晶一朗42・藤生 慎42
      - 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

2020年末から地殻変動を伴う群発地震活動が継続する能登半島北東部では、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、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)の地震が発生した。この一連の地震活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、津波調査、地域経済・復興過程影響調査を実施している。

#### 1. はじめに

2020年末から地震活動の活発化と局所的な地殻変動が始まった能登半島北東部において、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。この地震による人的被害は、死者1人、重傷者2人、軽傷者45人であり、住家被害は、全壊38棟、半壊263棟、一部破損1384棟であった(石川県危機管理監室、2023)。この地震後、地震活動域は北側の海域に大きく広がり、地震像や被害要因の解明のためには、陸域のみならず海域においても調査観測を実施する必要性が生じ、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」が実施されることとなった。

そして、地震活動や地殻変動がやや鈍化傾向を見せる中、2024年1月1日16時10分にこれまでの群発地震活動域を震源として、マグニチュード7.6、最大震度7の令和6年能登半島地震が発生した。強い地震動による建造物の倒壊や斜面崩壊、火災および津波により、石川県では人的被害として、死者339人(うち災害関連死110人)、行方不明者3人、重傷者335人、軽傷者876人があり、住家被害として全壊5,910棟、半壊16,231棟、一部破損60,426棟があった(令和6年8月

21日14時現在)(石川県危機管理監室危機対策課, 2024)。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 の喪失により,多数の孤立集落が発生し,半島型の 災害として注目された。令和6年能登半島地震の発生 を受けて,科学研究費助成事業(特別研究促進費)の 総合調査に追加助成と研究期間の令和6年度末まで の延長があり,研究分担者および研究テーマの追加 が行われた。

#### 2. 研究計画の概要

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)。なお、テーマ11と12は令和6年能登

### 表112のテーマの研究分担者

テーマ1		テーマ9	
岡田 知己	  東北大学大学院理学研究科	村田 晶	金沢大学理工研究域地球社会基盤学系
高木 涼太	東北大学大学院理学研究科	石川浩一郎	福井大学学術研究院工学系部門
吉田 圭佑	東北大学大学院理学研究科	山岸 邦彰	金沢工業大学建築学部
松本 聡	九州大学大学院理学研究院	須田 達	金沢工業大学建築学部
江本 賢太郎	九州大学大学院理学研究院	山﨑新太郎	京都大学防災研究所
山中 佳子	名古屋大学大学院環境学研究科	古谷 元	富山県立大学工学部
勝俣 啓	北海道大学大学院理学研究院	小林 俊一	金沢大学理工研究域地球社会基盤学系
	弘前大学大学院理工学研究科	高原 利幸	金沢工業大学工学部
石瀬 素子	山形大学理学部	金澤 伸一	新潟大学工学部
11 (根 米 )		保坂 良則	新潟大学教育研究院自然科学系
= -2		王功輝	京都大学防災研究所
テーマ2	<b>支力公司</b>	上部 厚志	新潟大学災害・復興科学研究所
篠原 雅尚	東京大学地震研究所	片岡 香子	新潟大学災害・復興科学研究所
蔵下 英司	東京大学地震研究所		
酒井 慎一	東京大学大学院情報学環	高清水 康博	新潟大学教育研究院人文社会科学系
		テーマ10	
テーマ3		青木 賢人	金沢大学人間社会研究域地域創造学系
西村 卓也	  京都大学防災研究所	林 紀代美	金沢大学人間社会研究域地域創造学系
太田 雄策	東北大学大学院理学研究科	武田 公子	金沢大学人間社会研究域経済学経営学系
木下 陽平	筑波大学システム情報系	田中 純一	北陸学院大学社会学部
宮崎 真一	京都大学大学院理学研究科	井口 克郎	神戸大学大学院人間発達環境学研究科
テーマ4	777 J. 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7	佐々木大輔	東北大学災害科学国際研究所
後藤 忠徳	  兵庫県立大学大学院理学研究科	原 裕太	東北大学災害科学国際研究所
	海洋研究開発機構海洋機能利用部門	吉田 浩	東北大学大学院経済学研究科
吉村 令慧	京都大学防災研究所	永松 伸吾	防災科学技術研究所・災害過程研究部
	21 B2 C 1 123 2 C 191 2 B 121		門
テーマ5		テーマ11	
田中 愛幸	東京大学大学院理学研究科	由比 政年	金沢大学理工研究域地球社会基盤学系
宮澤 理稔	京都大学防災研究所	犬飼 直之	長岡技術科学大学環境社会基盤系
荒木英一郎	海洋研究開発機構海域地震火山部門	楳田 真也	金沢大学理工研究域地球社会基盤学系
テーマ6		有田 守	金沢工業大学工学部
鹿児島渉悟	  富山大学学術研究部理学系	馬場 俊孝	徳島大学大学院社会産業理工学研究部
森下 知晃	金沢大学理工研究域地球社会基盤学系	二宮 順一	金沢大学理工研究域地球社会基盤学系
テーマ7	至1/1/17 工工型 / 10 次恒水压五至重于水	郷右近 英臣	北陸先端科学技術大学院大学先端科学
石山 達也	東京大学地震研究所		技術研究科
立石 良	富山大学学術研究部都市デザイン学系	林 豊	気象庁気象研究所地震津波研究部
安江 健一	富山大学学術研究部都市デザイン学系		
廣内 大助	信州大学学術研究院教育学系		
松多 信尚			
宍倉 正展	四口八子子前切元匹数百子吸  産業技術総合研究所地質調査総合センター		
テーマ8	注示以門がロッパル/川地具  柳耳  松口 ピンクー	テーマ12	
ラーマ8 岩田 知孝	京都大学防災研究所		京都大学防災研究所
浅野 公之 大堀 道広	京都大学防災研究所	梶谷 義雄	香川大学創造工学部
	淡如目 4 上		
八畑 坦広	滋賀県立大学環境科学部	中山 晶一朗藤生 慎	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

半島地震を受けての追加助成の際に新規に立ち上げられたテーマである。

- 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

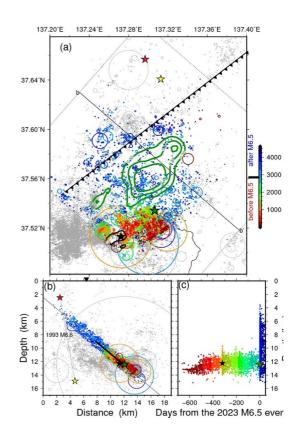


図-1 能登半島の地震活動: 珠洲沖活断層セグメント・1993 年 M6.6 地震と 2023 年 M6.5 地震の関係 (Yoshida et al., 2023b)。

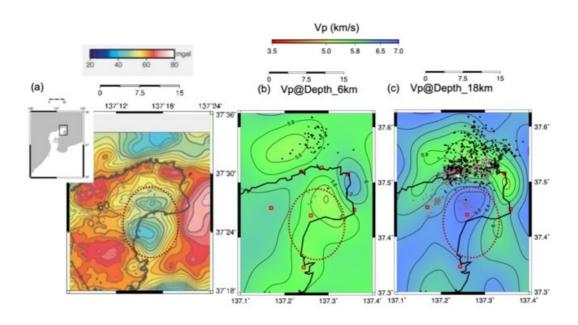
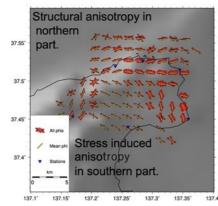


図-2 能登半島北東部の地殻構造 (Okada et al., 2024)。a) 澤田・他 (2012)によるブーゲー重力異常。赤点線の楕円は低重力異常域を示す。(b) 深さ 6km の Vp、灰色は 2018 年から 2023 年の M6.5 地震前までの地震。白星は 2022 年 M5.4 の地震。黒は 2023 年の M6.5 地震以降の地震。黒星は 2023 年 M6.5 の地震。赤四角は使用した観測点。(c) 深さ 18km の Vp。

#### (a) S波偏向異方性方向の分布



群発地震震源域の南部は応力による異方性、 北部は断層などの構造による異方性 北部では断層などの構造が発達しており地震活動も より活発である Okada et al., 2024 Earth, Planets, Space 10.1186/s40623-024-01974-0

(b) 深さ18kmのP波・S波速度比 (c) 左図のB-B'鉛直断面図

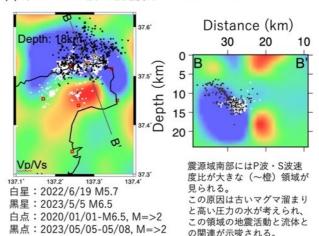


図-3 (a) 能登半島群発地震震源域における S 波偏向異方性方向。(b) 深さ 18km における Vp/Vs 構造 (c) B-B' 断面図。Okada et al. (2024)より引用。

#### 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

2020年末から継続する能登半島の群発地震を詳細に調べ、この群発地震が複数の面構造を通って浅部に移動していたこと、その開始部付近の地震波反射面が存在していたことを示した。その結果から、この群発地震活動と 2023年5月5日に珠洲で発生した M6.5の地震が流体移動とそれに引き起こされた非地震性変形により引き起こされた可能性が高いことを示した(図-1) (Yoshida et al., 2023a, 2023b)。

また,群発地震震源域の地震波速度構造を推定した(図-2,図-3)。その結果,群発活動が開始した南部においては,活動域の深部に高Vp(P波速度),高Vp/Vs(P波速度とS波速度の比)の領域を確認した。この原因は古いマグマ溜まりと高い圧力の水が考えられ,この領域の地震活動と流体との関連が示唆される。また,S波スプリッティング解析を行なった(図-3)。群発地震震源域の南部は応力による異方性,北部は断層などの構造による異方性が確認された。北部では断層などの構造が発達しており地震活動もより活発であったと推察される(Okada et al., 2024)。

令和6年能登半島地震についても、引き続き陸域を中心とした、余震分布・地震波速度構造・S波スプリッティング解析等の継続検討を行っている。予備的な検討結果として以下の結果を得た。余震は、震源域西側では南東傾斜、震源域東側では北西傾斜の

構造に集中している。応力場に対し各断層は滑りやすい状態にあったと推定される。能登半島地震の本震震源も、高Vp、低Vs(S波速度)、高Vp/Vs領域の付近に位置しており、水との関わりが示唆される(東北大学・他、2024)。

## 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 2023 年 5 月 5 日 M<sub>j</sub>6.5 後の地震活動域 における海陸統合臨時地震観測

2023年5月5日に発生したM<sub>i</sub>6.5の地震は、それ以前 の地震活動域の北端付近で発生した。このM<sub>i</sub>6.5の地 震が発生した以降の地震活動域は, 珠洲市沖の海域 に拡大し, それまでの地震活動とは異なる様相を示 している。M<sub>i</sub>6.5の地震と地下の流体や構造,海底活 断層との関係性を明らかにすることは、この地域に おける地震発生過程の解明の為に必要であり, 高精 度な震源分布は最も基本的な情報になる。高精度な 震源分布を得る為には, 震源域直上に地震計を配置 した地震観測を行うことが望ましい。そこで、海域 に広がった群発地震活動域の直上にあたる珠洲市北 方沖に約5 km間隔で4か所,珠洲市東方沖の1か所に 浅海用係留ブイ方式海底観測システム(Shinohara et al., 2022)を設置した。観測は, 2023年6月26日から7月 5日まで実施し、全台を回収した。それと同時期に、 陸域の珠洲市北岸から東岸の海岸線沿いと県道52号 線に1km~5km間隔で12か所に臨時地震観測点を設置

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, 能登半島やその周辺域のテレメータ観測点 (23 カ所) で得られている波形データとの統合処理を実 施した。統合処理後のデータに対して気象庁一元化 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。イベントデータから、観測期間中 に海陸統合地震観測網内で発生した203個 (Mj≥1.0) の地震を抽出し、各観測点におけるP波到達時刻、S 波到達時刻,最大振幅,P波初動振動方向の読み取り 作業を行った。Mi6.5後に広がった群発地震活動域に おける3次元速度構造と詳細な震源分布を得る為に、 得られた走時データを用いて地震波トモグラフィー 解析 (Zhang and Thurber, 2003)を実施した。また、ト モグラフィー解析で得られた速度構造を使用し, 2023年5月5日から2024年1月1日までの気象庁一元化 処理震源の検測値を用いた震源再決定を行った。得 られた震源分布からは, 珠洲市北岸沖から, 南東傾 斜の震源分布が確認できる。その深さは「日本海地 震・津波調査プロジェクト」によるモデル断層のNT5 よりも深部側に位置する。気象庁一元化震源と比較 すると,海陸統合データによる震源の方が数kmほど 浅く求目られ、線状に配列している。また、南東傾斜 を示す震源分布の深部近傍には、周囲よりVp/Vsが高 く, Vpが低くなる領域が存在することから, 流体の 存在が示唆される。

## 3.2.2 令和6年能登半島地震の海域緊急余震 観測

落下自己浮上式海底地震計(OBS)を用いて実施して

令和6年能登半島地震の海域緊急余震観測を,自由

いる。海洋研究開発機構所属学術研究船「白鳳丸」に よる緊急調査航海(2024年1月16日 東京出港-1月23 日 富山入港)により、OBSの設置を行った。使用した OBSの種類は、短周期地震計を用いた短期観測型 OBS (SPOBS), 長期観測型 OBS (LTOBS), および広 帯域OBS (BBOBS)である。設置したOBSのうち, SPOBS は、学術研究船「白鳳丸」緊急調査航海(第 二次)(2月18日 新潟出港-3月1日 富山入港)により 回収された。1月に設置した LTOBSとBBOBSについ ては, 海底観測を継続すると共に, 「白鳳丸」 緊急調 査航海(第二次)により,長期観測可能なOBSを追加 設置した. 2 月下旬に回収されたSPOBS 25 台と能 登半島東部の陸上観測点 4 点のデータを用いて,余 震震源決定を行った。気象庁一元化リストに基づき, 観測期間内で観測網近辺に震央があるMi1.7以上の 地震881個について、読み取りを行った。この領域で は、OBSとエアガンを用いた構造探査 (Nakahigashi et al., 2012) が行われており、その結果から一次元速度 構造を作成し、震源決定を実施した。まず、絶対走時 と一次元構造を用いる震源決定プログラム (Hirata and Matsu'ura, 1987) により、初期震源を決定した。 その際、SP 変換波、PS 変換波の到着時刻を基とし

た観測点補正値を導入し、観測点直下の速度不均質

を補正した. その後, 初期震源を用いて, Double Difference 法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000)により 再決定を行った。震源再決定の結果, 余震は「日本海 地震・津波調査プロジェクト」による断層モデルに 沿うように分布し、能登半島沿岸では深さ10km程度 まで、沖合では深さ18km程度まで発生していること がわかった。「日本海地震・津波調査プロジェクト」 によるモデル断層NT2 の深部において、最も深い地 震が発生しているが、NT2の北端では地震活動がみ られない. 気象庁一元化震源と比較すると, OBS デ ータによる震源は10kmほど浅く求目られている。震 源再決定された地震について, 各観測点の P 波初動 極性から, グリッドサーチ法 (Reasenberg and Oppenheimer, 1985) を用いて発震機構解を求めた。 各観測点への射出角と方位角は, DD 法で求められ た値を用いた。 得られた発震機構解をFrohlich (2001) に従って分類した結果から、逆断層型の余震 が発生していると共に, 横ずれ型の地震も数多く発 生していることが推察される。

## 3.3 測地観測による地殻変動メカニズムの解明

GNSSの観測解析では、2024年1月16-17日にM7.6の 地震の震源域の西端付近の3か所で臨時観測を新た に開始した。周辺の国土地理院GEONET定常観測点, 大学と地理院の臨時観測点, 及びソフトバンク株式 会社の独自基準点のデータを合わせた統合解析を実 施し、M6.5及びM7.6の地震時及び地震前後の詳細な 地殻変動の把握とそのメカニズムの推定を行なった。 M6.5地震については最大約19 cm, M7.6地震について は、最大約240 cmの地震時地殻変動が観測された。 M7.6地震については、キネマティック解析による1 秒ごとの座標値も計算した。震源に近い能登半島北 東部の観測点では,変位が始まってから永久変位に 到達するまで20秒以上かかっているのに対し、能登 半島北西部の観測点では、5秒程度で永久変位に至 っていた。この時間差は、北東部では地下の断層運 動が比較的複雑に進展したのに対し、北西部では一 気に断層運動が進展したものと考えられる。M7.6地 震後には余効変動が継続し、地震時地殻変動と似た 水平変動パターンを示している。一方,上下変動で は能登半島北部は地震時に隆起したのに対し, 地震

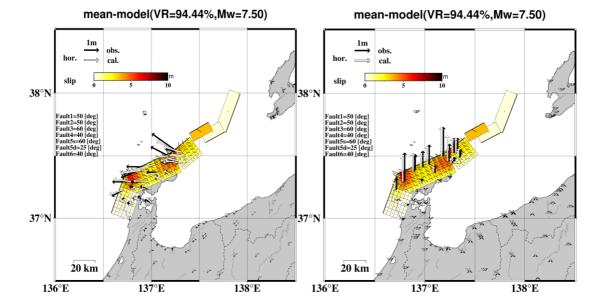


図-4 稠密測地観測データにもとづいて推定された 2024 年能登半島地震(M7.6)の地震時すべり分布。(左)推定されたすべり分布と GNSS の水平成分の観測値(黒矢印)と計算値(白矢印)の比較。(右)推定されたすべり分布と GNSS の上下成分の観測値(黒矢印)と計算値(白矢印)の比較。

後は沈降が続いている。GNSS観測点での変動量は、 地震時隆起の2 m程度に比べて、地震後の沈降量は5 cm程度と小さく、変動のメカニズムは主として、マ ントルでの粘弾性緩和によるものと考えられる。こ のような粘弾性緩和による沈降は、長期間継続する ことが見込まれ、今後30年間で40 cm以上に達する可 能性がある。

合成開口レーダーの干渉 (InSAR) 解析については、ALOS-2およびSentinel-1データを用いた解析を行い、2023年5月5日に発生したM6.5地震に伴う地表面変位を検出した。高い干渉性を示したALOS-2 InSAR画像の地表面変位を説明できる断層すべりモデルをベイジアンインバージョン法によって推定し、他の観測に基づいた断層すべりモデルと整合的な結果が得られた。2020年末から続いている継続的地殻変動による応力変化が2023年の震源断層に及ぼした影響をクーロン破壊応力変化によって推定し、地震発生をトリガーするセンスの変化が生じていたという推定結果が得られた。また、2024年1月1日に発生したM7.6の地震に対しては、ALOS-2データを用いたオフセットトラッキング法を用いて地震時の地表面変位を検出した。

これらの稠密測地観測データにもとづいてM7.6地 震の地震時すべり分布推定を行った。具体的には、 国土地理院GEONETに加えて、ソフトバンクが運用 する独自GNSS観測網、および京都大学・金沢大学が 展開している臨時GNSS観測点のデータ、さらに ALOS-2/PALSAR-2データのピクセルオフセットに

よるLOS変位データを用いた。GNSSデータは2023年 12月22-31日の平均と2024年1月4-8日の平均値の差を 用いた。断層面は合計で6枚を先行研究等にもとづい て仮定し、そのうち、陸域測地観測データでは感度 が低い沖合の3枚については、Fujii and Satake (2024) の断層幾何・すべり量をそのまま使用した。さらに 能登半島中央部の断層については, 余震分布や海域 断層情報総合評価プロジェクトで提示された断層モ デルを参考とし、浅部では高角、深部では低角のリ ストリックな断層面を仮定した。これら仮定した断 層面上でのすべり分布をハミルトニアンモンテカル 口法 (HMC法) を用いて推定した (図-4)。推定され た地震時すべりは主として2つのピークを持つ。リス トリックな断層面を仮定することで、水平・上下成 分をバランスよく説明できるモデルを構築可能であ る。得られた断層すべり分布は、仮定した断層面に 沿った余震分布と大局的には相補的な結果となった。

### 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

2021-2022年度に実施した陸上計57か所での広帯域MT観測,珠洲沖3か所での海底MT観測の解析を進めるとともに、海域2か所での補充観測を実施した(写真-1)。補充観測は、M6.5地震の破壊域・余震域の測点密度を向上させる配置とした。また、M7.6の地震の発生を受けて、珠洲沖ならびに能登一佐渡間海域の7か所において緊急海底観測を実施し、内5



写真-1 海底電位差磁力計 (OBEM) の投入 (2023 年 8 月) の様子。

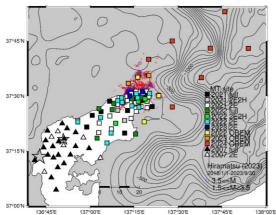


図-5 2023 年度末までの能登半島での陸域・海域の MT 観測点分布。

か所については現在も計測を継続している(図-5)。

陸上55点のデータのみを用いて予察的に推定した 3次元比抵抗構造において、M6.5ならびにM7.6地震 のすべり分布と対比したところ、各地震におけるす べり量の大きい領域は、相対的に高比抵抗な領域に 対応する傾向が確認された。

2022年12月からオフラインで開始した長期連続MT観測では、M6.5の地震発生を受けテレメータ化を行った。M6.5およびM7.6の地震発生時、それぞれ4か所で電磁場変動を記録できた。電磁場データ中、地磁気水平成分と鉛直成分の比から推定される地磁気変換関数の特定周期において、M6.5地震以降に長期的な変化が認められた。年周変化等の地下構造に起因しない変動との区別するために、連続観測を継続している。

## 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年度は5月,9月,1月,3月の計4回,重力観測を実施した。観測は,京大防災研・金沢大の協力のもと東大理学系・東大地震研・富山大が共同で行っ

た。これらの結果と2023年3月の観測結果を合わせる ことで、2023年のM6.5および2024年のM7.6地震前後 の重力変化を捉えた。絶対重力計により大地震前後 の重力変化が観測された例は国際的にも少なく、貴 重なデータが得られた。GNSSで観測した地震時の高 さ変化を用いて、高さ変化に比例する重力変化を除 去し, 重力異常を求めた。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に加え輪島験潮 場で負の有意な重力異常が認められた。M6.5地震に ついて, 非テクトニックな要因による重力変化を見 積もったところ、観測点近傍で局所的に大きな地下 水位の変動が起きたとしない限り重力異常が説明で きないことが分かった。代わりに、 開口断層を地震 時断層の上部に置くことで, 重力異常と地殻変動の 双方を説明できる。現在, M7.6地震についても同様 のモデリングを進めている。

#### 3.5.2 光ファイバセンシング

2023年に、能登町~珠洲市に設置されている約28km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2m間隔という超高密度で捉えた。群発地震活動域の下部地殻に、局所的に地震波反射体が存在する可能性を示唆する記録を得た。また有感地震に対する記録から得た揺れの分布は、地盤増幅率の分布とおおよそ対応していると考えられるため、この記録と、M7.6地震後に情報通信研究機構により測定された、構造物が被害を受けたと考えられる散乱強度の分布とを比較し、珠洲市街地・住宅地における道路沿いの揺れやすさと被害との対応を検討した。

### 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

地震活動域周辺の地点の温泉・地下水(内5地点は 2-3か月に1回程度の定点観測)で試料採取を行い(写真-2)、希ガス同位体組成(He, Ne)、陰イオン濃度(Cl、SO4 $^2$ )、水の酸素・水素同位体比を測定し、2022年 6月以降の化学データの時間変動を調査した。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、震源集中域の南クラスター上に位置する温泉では、特に顕著な化学データの時間変動が観測された。陰イオン濃度、 $\delta^{18}$ O値、 $\delta$  D値は、2022年から2023年5-10月にかけて低下したが、その後2024年1月の令和6年能登半島地震直後にかけて上昇した。また、大気成分を補正した $^3$ He/ $^4$ He比は2022年から2023年7月にかけて2.9 Ra (1 Ra: 大気の $^3$ He/ $^4$ He比1.4×10-6)程度から2.3 Ra



写真-2 温泉水試料の採取風景。

まで低下し、その後2024年1月の令和6年能登半島地震直後にかけて3.2Raまで上昇した。深部流体が大気よりも高い³He/⁴Heを持つマントル起源物質に富むのであれば、その成分の混入率の増減によって温泉・地下水の³He/⁴He比は上昇・低下すると考えられる。化学データの時間変動は、地震活動に伴う岩盤の透水性の変化や、深部流体の挙動に伴うマントル起源物質を含む深部流体成分の混入率の変化といった過程を反映したものと考えられる。

#### 3.6.2 火山岩類の分析

能登半島地震の群発地震に関与している流体の起 源を理解するための基本情報として, 能登半島の地 殻を構成する地質・岩石に基づく、日本海―能登半 島形成史の理解が必要である。能登半島には日本海 形成以前の変成岩の上に、日本海形成に伴う火山活 動によって形成された火山岩類・火山砕屑物が厚く 覆っていると考えられている。能登半島地域の火山 岩類の層序学的研究は完全には明らかにされていな い。2007年能登半島地震では、輪島市門前町周辺で 海底が隆起した。その結果、新しい岩石が海岸に露 出したことから,これらの地域(輪島市門前地域)の 新しい露頭に露出する火山岩類について研究を進め ている。それらの結果、以下の新しい知見が得られ た。1)他の北陸地域(石川県白山市,能登半島宝達 山, 富山県臼中地域) で, 日本海形成初期の火山活動 に特徴的な月長石斑晶を含む珪長質火山岩が発見さ れた。2) 本地域は、これ以前の火山活動の記録が残 されている貴重な場所である可能性が出てきた。3) これらの火山岩の形成には大陸地殻(つまり、基盤 となる変成岩)の部分溶融などが関与している可能 性が考えられる。

## 3.7 活構造調査による震源域の古地震活動像 の解明

#### 3.7.1 2023年5月5日の地震(M6.5)および2024

#### 年1月1日の地震(M7.6)による降起量調査

海岸沿いの岩礁や岸壁では、海面付近に様々な生物が固着しており、隆起すると相対的に海面が低下するため、これらの生物は常に海面より高い位置に分布することになり、その後死滅する。これらの生物の分布高度を岩礁・岸壁にて計測し、隆起量を把握した。M6.5の地震による隆起量は、最大で0.3 m程度であり、狼煙漁港(折戸)~シャク岬付近をピークに東西へ減少する。また、M7.6の地震による隆起量は、半島北西部の猿山岬周辺、半島北東部の鞍崎周辺に大きな隆起量を示し、部分的に鴨ヶ浦で周囲より大きな隆起量を示し、部分的に鴨ヶ浦で周囲より大きな隆起量を示し、部分的に鴨ヶ浦で周囲より大きな隆起量を示す。これらの隆起量の空間分布は、SAR干渉解析(2.5次元解析)結果(国土地理院、2023、2024)と調和的である。

## 3.7.2 震源域周辺の変動地形調査および離水 年代の推定のための地質調査

能登半島北部の航空レーザー測量データから高解 像度数値標高データを生成し, 完新世の離水岩石海 岸地形を把握した。さらに, 複数段の完新世段丘の 離水年代を推定するために珠洲市の馬緤地区と川浦 地区にて掘削調査を実施した。馬緤地区の標高約 7.5 m 地点にて深度 2 m 付近の腐植層の 14C 年代 が 1830~1720 cal BP であるなど, 岩石海岸が広く 分布する地域でも調査対象の堆積物や年代測定試料 が分布することを確認した。また、M7.6の地震によ る隆起量の計測において,藻類,貝類,地形に注目 して観察し、平均海水面を境に海藻のピリヒバと貝 類のヤッコカンザシとが明確に棲み分けていること を明らかにした。このことは、化石生物遺骸群集の 離水年代と標高から,隆起速度,活動時期などの推 定を可能にする。本研究において、輪島市町野町 曽々木におけるヤッコカンザシを計測し, 標高が 0.934 m, 14C 年代が 930±30 cal BP という結果を

今後、M7.6の地震による海岸の隆起量分布を踏まえた掘削調査による堆積物の観察と年代測定データの蓄積、化石生物遺骸群集の離水年代と標高のデータの蓄積から、古地震活動の時期やこれによる地殻変動と震源断層像を推定することが課題である。

## 3.8 震源過程と強震観測に基づく高震度生成過程調査

2023年5月5日M6.5の地震、および2024年1月1日 M7.6の地震に対する震源過程と強震観測に基づく高 震度の生成過程について述べる。

#### 3.8.1 M6.5 の震源過程と強震動生成過程

地震活動が続く能登半島北部において2023年5月

5 日に M6.5 の地震が発生し、珠洲市 K-NET 正院 (ISK002)では震度6強を観測して、珠洲市市街地で は建物倒壊が起きた。この地震の震源過程を波形イ ンバージョンにより推定するとともに、強震動シミ ュレーションによる強震動生成モデルを構築した。 推定された震源過程は, 逆断層すべりが卓越し, 破 壊開始点(深さ約12km)より北の海底浅部に向かっ て,破壊が進行した。地震分布も参考にすると,M6.5 の地震の震源断層は、2022年6月19日のM5.9と同 じ断層面(南東に下がる断層面)にあり、2022年6 月 19 日 M5.9 の地震よりも浅い部分を破壊したと考 えられる。M6.5の断層破壊過程モデルを参照し、震 源近傍の観測点の広帯域シミュレーションに基づく 強震動生成モデルを求めた。結果, 波形インバージ ョンによるすべりの大きい領域に約3km四方の強震 動生成域が推定された。

#### 3.8.2 強震記録に基づく M7.6 の震源過程

2024年1月1日に発生し、最大震度7を観測したM7.6の地震の震源過程を強震記録の波形インバージョンにより推定した。初めに、能登半島沿岸部の震源断層が破壊し、能登半島北西部での隆起や強震動の主要因と考えられる大きなすべりが生じた。最初の破壊の約13秒後に、珠洲市直下で第2の破壊が開始し、主として富山トラフ方面に向かって東向きに破壊が伝播し、海域の直下で大きなすべりを生じ、結果としてMw7.3程度の地震が連動して発生することで、全体としてMw7.5の地震になったと推定された。引き続き、緊急の海底地震観測や地殻変動調査の進展による詳細な情報を踏まえ、断層破壊モデルの改良と高震度生成過程との関係について調査を継続していく必要がある。

## 3.8.3 強震観測に基づく珠洲地震被害域の強震動特性

2022年6月19日に能登半島北東部でM5.4の地震が発生し、珠洲市のK-NET正院(ISK002)ではこの地震の最大震度となる6弱を記録した。同年7月初めに、被害が集中した珠洲市正院地区を主とする6点に地震計を設置し、臨時強震観測を継続する中で、2023年5月5日に能登半島北東部の地震(M6.5)と2024年1月1日に能登半島地震(M7.6)が発生した。ISK002ではこれらの2地震において震度6強を記録した。臨時強震観測点では6点のうち4点で観測記録が得られた。観測記録には速度計センサーの感度補正及び、振幅および周期に依存したロガーの特性補正が必要となった(大堀ら、2023)。このため、京都大学防災研究所および名古屋大学における振動台実験に基づくロガーの特性補正を行った結果、2023

年5月5日の地震では臨時強震観測点4点における 計測震度相当値は震度6弱から6強と推定され,2024 年1月1日の地震では4点で震度6強と推定された。

### 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 令和5年奥能登地震 (M6.5)

令和5年奥能登地震 (M6.5) による建物被害全数調 査(建物悉皆調査)を珠洲市正院地区で実施した。調 査概要については、調査棟数997棟、調査内容は建物 概況(構造形式・用途・築年数・階数等),被害程度 である。被害程度については岡田・高井により提案 された被害分類であるダメージグレード(D0:無被 害~D6:居住空間の著しい欠損)を用いて評価した (岡田ら, 2009)。調査の結果,正院地区全体では7 割程度の住宅でD1以上の被害が生じた。また地区分 布としては正院町の東側の海岸近くや地区中央で被 害が集中しているところがあるが、小路地区・川尻 地区においては被害が特に集中している箇所は見ら れなかった。また,正院町の地震動特性の分布の把 握のため, 同地区で地盤常時微動観測を実施した。 観測点は住宅被害全数調査を行った範囲に100m× 100mメッシュ(標準地域メッシュの3次メッシュの 1/10) を設定し、メッシュの中心近くで微動計を設置 可能な点とした。観測結果と建物被害(建物全壊率  $(=((D4\sim D6)+D3/2)/総数))$ の関係について、全壊 率が10%以上のメッシュでは常時微動の卓越周期が 0.4~0.6秒程度となっていることを明らかにした。

#### 3.9.2 令和6年能登半島地震(M7.6)

令和6年能登半島地震(M7.6)による建物被害全 数調査については, 先の地震と同様な手法により実 施した。調査対象地区として9地区(珠洲市正院地 区, 飯田地区, 宝立町鵜飼地区, 輪島市河井地区, 鳳 至地区, 門前町走出・舘地区, 門前町道下地区, 門前 町黒島地区, 穴水町大町地区) 調査した。調査棟数は 7,000 棟強である。現在,調査分析中であるが,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。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。

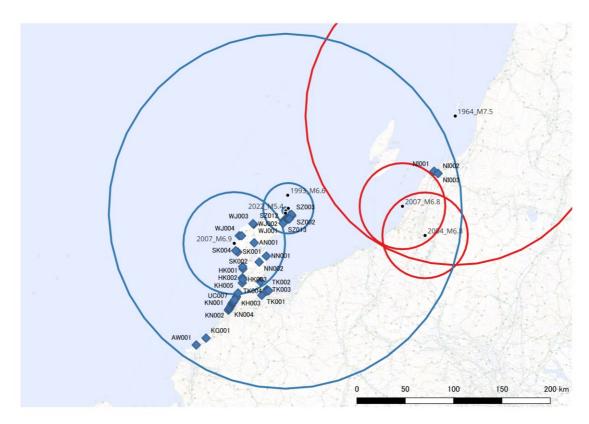


図-6 2024 年 M7.6 地震による液状化発生確認地点および液状化限界震央距離

#### 3.9.3 地盤の液状化発生状況とその特徴

地震動による直接的な地盤災害は主に地盤の液状 化現象と斜面災害に分けられる。本報告では前者に ついて説明する。地盤の液状化が発生しやすい条件 は,(1)緩い砂質土,(2)間隙が水で飽和,(3)激しい 繰返しせん断,の3つである。北陸地域の日本海沿岸 には日本でも有数の規模の大きな海岸砂丘が発達し ている(藤,1975)。特に内陸側・潟湖側の砂丘末端 部は緩く堆積した砂地盤で地下水位も地表面に近い ため, 北陸地域には砂丘近辺に潜在的に地盤の液状 化リスクが高いエリアがある。一方で液状化を生じ させる地震動については、気象庁マグニチュードM と液状化限界震央距離R[km]の関係式 log<sub>10</sub> R= 0.77M-3.6 (栗林ら,1975)が知られている。これら を念頭に2023年M6.5地震と2024年M7.6地震で発生 した地盤の液状化被害を説明する。2024年M7.6地震 による液状化発生確認地点と液状化限界震央距離R を図-6に示す。図中の同心円は、2024年地震の他、 1993年能登半島沖地震, 2007年能登半島地震, 1964 年新潟地震,2004年中越地震,2007年中越沖地震に よる液状化限界震央距離である。2024年M7.6地震で はR≈178.6[km]となるが、今回の液状化発生状況は栗 林らの式と良い整合を示す。なお報道等によれば福 井県坂井市の福井港臨港道路, 新潟県佐渡, 富山市 は記入していない。5次(250m)メッシュの微地形分類(若松ら,2020)を援用し液状化発生確認地点の微地形を調べたところ,自然地盤では砂丘,海岸低地,砂州,人工地盤では海岸・湖沼沿いの埋立地や後背湿地上の宅地盛土で液状化の発生が確認された。

2024年M7.6地震で発生した液状化のうち、内灘砂丘と新潟砂丘周辺の状況を簡単にまとめる。

内灘町宮坂地区からかほく市大崎地区の広い地域 で、メートルオーダーの大規模な側方流動を伴う地 盤の液状化が発生したことが特徴である。これらの 地域は内灘砂丘潟湖側の静穏な堆積環境の緩い飽和 砂層が形成された地域である。また1963年からの河 北潟干拓事業では干拓用土砂を充当するために当該 地域の砂丘を大規模に掘削し, 掘削後の平坦な土地 を畑地や住宅に転用するなど, 大規模な地形改変を 受けた地域でもある。堆積環境や地形改変など過去 の履歴には共通性がある反面, 噴砂や側方流動の発 生状況や程度は地区ごとに差異が見られる。これは その他の要因、地表面高さや地下水位面の位置が地 盤の液状化発生に大きく影響することを示唆する。 例えば, 西荒屋, 室(南), 大崎の各地区では県道8 号線より砂丘側でも噴砂や大きな地盤変形が発生し, 県道との境界に当たる地盤にはリッジ(盛り上がり) を生じている箇所が多い。これに対して、室(北)地

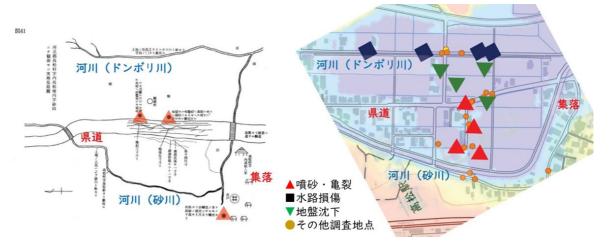


図-7 かほく市内高松における濃尾地震(1891)と能登半島地震(2024)の液状化発生状況

区の県道8号より砂丘側では、噴砂箇所は少なく地盤変状も小さい。この事実は地区の恒久的な液状化対策を考えるうえで重要である。地区によっては委員会を設置して液状化対策を検討する計画があり、今後詳細な地盤調査が実施される予定である。

新潟市内で2024年M7.6地震の液状化発生が確認された地点は、砂丘末端部や旧河道部などで、過去1964年新潟地震でも液状化が報告されている。2004年中越地震、2007年中越沖地震では新潟市内の液状化発生事例は報告されていないが、これは液状化限界震央距離(栗林ら、1986)で説明可能である。新潟市内の砂丘末端部においても、平常時より湧水が見られる地点が複数あり、地表面付近に地下水位があることも液状化発生の要因と考えられる。なお新潟市域においては過去に水溶性天然ガス採掘のため大量の地下水を汲み上げていたため、新潟砂丘の裾部を通る県道よりも南側の地域は広くゼロメートル地帯となっていることも地形的な特徴である。

過去の地震で地盤の液状化が発生した地点で再度 液状化が発生することを地盤の再液状化と呼ぶ。 2024年M7.6地震で地盤の液状化が発生した地点のう ち,過去の地震で液状化発生の記録が残されている 地点を列挙する。濃尾地震(1891):かほく市内高松, 内灘町大根布,内灘町室(村松ほか,1992)。このう ち内高松については概略地図が添えられており,今 回の液状化発生とほぼ同じ地点で過去にも液状化が 発生していることが確認できた。金沢地震(1799): 金沢市粟崎,内灘町根布,宮坂,荒谷,かほく市大崎 (寒川,1986)。砂丘の砂が崩壊して家屋が埋没,潟 中に砂が噴きだして島を形成,などの記録が残され ている。飛越地震(1861):高岡市伏木,高岡市吉久 (内閣府,2008)。地割れや水砂が噴きだす等の記録 が残されている。さらに能登半島沖地震(1993)では 珠洲市飯田町(埋立地),正院町(自然地盤の宅地), 蛸島町(埋立地)の液状化発生事例(森ら,1993)があり,2007年能登半島地震では,宅地の液状化事例 として輪島市門前町(清水、道下、広瀬)や珠洲市正院,また港湾地区における海岸埋立地の液状化事例 として,志賀町(松ケ下港),輪島市(輪島港),穴水町(穴水港),七尾市(七尾港),高岡市(伏木港)が報告されている(土木学会・地盤工学会,2007)(沼田ら,2007)。2023年M6.5地震では珠洲市内の2か所,飯田港周辺および蛸島漁港で噴砂を確認した。いずれも海岸付近の埋立地であり,1993年能登半島沖地震,2007年能登半島地震でも噴砂が発生したとの報告がある。珠洲市内の多くが限界震央距離以内に位置するが,この他の地点では噴砂等の液状化を示唆する痕跡は見つけられなかった。

図-7 は濃尾地震における内高松の液状化記録(村松ら,1992)と2024年M7.6地震の被災状況の比較である。濃尾地震後のアンケート調査で図に残された地形的特徴から液状化発生地点が特定できた。この地点は微地形分類では谷底低地とされ、北から流下した小河川が合流する地点である。合流後は大谷川として南側の砂礫質台地を貫入し、いくつかの河川と合流したのち、最終的には宇野気川として河北潟に注ぐ。濃尾地震の記録では地盤に亀裂が生じ、泥砂水が噴き出したことや液状化時の地盤震動の様子が残されている。2024年M7.6地震では県道周辺の畑地や住宅での噴砂の他、水路床の損傷も見られ、水路床下の地盤の支持力が地盤の液状化により一時的に喪失したことが推測される。

2023年M6.5地震と2024年M7.6地震による地盤の 液状化について俯瞰的に考察した。現時点での知見 として、地盤の液状化リスクが高い地点は何度でも 液状化が発生する可能性があること、栗林らの限界 震央距離は液状化リスクの高い地点の液状化可能性 を適切に推定できること、砂丘末端部の液状化発生 やその程度には、地下水面の位置が要因となること が挙げられる。一方、地盤は堆積環境などの履歴、強 度や物性分布、地下水面位置などが、地点ごとに大 きく変化することがある。また液状化発生やその程 度は入力地震動の大きさに強く依存する。具体的な 液状化対策実施に当たっては、適切な外力設定や、 地盤状況を把握する現地調査の実施など、慎重な検 討が必要である。

## 3.10 社会的脆弱性による災害時の地域への 影響調査

2023年奥能登地震に対しては「津波に対する住民 意識」「学校の防災対策に対する影響」「災害時の 自治体財政運営」「住宅・生活再建支援の課題」

「住民側から見た被災直後の状況の把握」「過疎地域におけるインクルーシブ防災等の現状」の6つのサブテーマを設定して研究を実施した。

2024年能登半島地震に関しては、2023年度内は大規模被災直後ということがあり、住民・行政に対する直接的な調査が困難であることから、社会的調査は十分には実施できていない。その中でも、「孤立集落における住民の対応行動調査」、「隆起・津波に伴う産業被害調査」、「被災環境下における学校再開に向けた対応に関する調査」、「震災遺構の保全活用に関する調査・提案」に関して研究を着手している。その一部については2024年3月に実施された日本地理学会大会において成果公表を行った(青木ら、2024)。

#### 3.10.1 津波に対する住民意識

「津波に対する住民意識」では津波想定における 到達想定時間の認識や、津波情報に関する主体的な 収集行動などについてアンケート調査を実施した結 果、知識・行動・認識が高いグループと、そもそも 奥能登地震後であっても防災に関する関心が低いグ ループとに二極化した構造が認められた。

#### 3.10.2 学校の防災対策に対する影響

「学校の防災対策に対する影響」では石川県内の 学校に対し、学校現場の被災に関する情報収集の有 無と学校防災計画の確認・見直しに関するアンケー ト調査を行った。被災地に近い能登地区の学校では 積極的な情報収集と安全計画の見直しが行われてい たが、加賀地区では自分事化ができておらず、不十 分な対応となっていたことが明らかになった。

#### 3.10.3 災害時の自治体財政運営

「災害時の自治体財政運営」では珠洲市の財政資料および担当者へのヒアリングによって珠洲市の奥能登地震への対応支出を分析し、基金の取り崩しによる財政支出の状況を明らかにするとともに、国庫負担金の状況を注視する必要があることが指摘された。

### 3.10.4 災害時の自治体財政運営

「住宅・生活再建支援の課題」では被災住民を対象としたヒアリング調査から、高齢化に伴う支援制度へのアクセス困難を有する住民が多いこと、納屋や土蔵などの被災に対する被災者生活再建支援法の限界などが指摘され、中期的な調査の継続の必要性が求められた。

## 3.10.5 住民側から見た被災直後の状況の把握

「住民側から見た被災直後の状況の把握」ではオンラインアンケートを利用した社会調査を実施し、東日本大震災時の同様の調査との比較から情報の入手先としてネットがより重要になってきていること、少子高齢化に伴い災害時に頼る人がいないという状況が浮き彫りとなった。

石川県の住宅(持家)の耐震状況に注目し、2018年の『住宅・土地統計調査』(総務省統計局)の市町村別のデータを用いて、耐震対応比率((1980年以前建築の旧耐震基準のうち耐震工事済み+81年以降の新基準)・総持ち家数)を計算した。令和5年奥能登地震及びその半年後の令和6年能登半島地震で大きな被害があった珠洲市と輪島市の耐震対応比率が全国水準を大幅に下回っており、石川県内の市・町内でも下位にあることが分かった(吉田、2024)。

そして、石川県の地震保険の付帯率を見ると、被害の多かった輪島市、珠洲市で高い付帯率となっており、上記の耐震対応比率の低い状況をある程度カバーできると言える。また、令和5年11月に実施された住民アンケート調査の個票データを用いても、珠洲市における地震保険への加入率が高いという結果が分かった。

## 3.10.6 過疎地域におけるインクルーシブ防 災等の現状

「過疎地域におけるインクルーシブ防災等の現状」では珠洲市担当者に対するヒアリング調査から災害 救助法による支援に加え基金からの支出などによって「誰一人取り残さない」ための支援が行われている実態が確認された.

## 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

石川県能登半島,富山湾,および,新潟県沿岸部を対象に、津波痕跡高(浸水高および遡上高)に関する現地観測を実施して、津波痕跡高や浸水範囲の分布に関する基礎データを取得した。また、能登半島北東部において、津波による建物被害や浸水深の分布特性に関する現地調査を行った。合わせて、撮影映像の解析や現地での聞き取り調査により、津波の到達時刻等についても推定を試みた。

結果として得られた浸水域分布は, 波源域との相 対位置や海底地形の影響により複雑なものとなった。 浸水被害の大半は能登半島北東部に集中し、最大で 5mを超える痕跡高が観測されたが、痕跡高の分布は 沿岸方向に一様ではなく,珠洲市寺家,飯田,春日 野・鵜飼地区および能登町白丸地区に極大値が点在 する形で振動的に変化する特徴を示した。対照的に, 能登半島の北部から西部にかけては, 地震に伴う地 盤隆起が、津波遡上・浸水に対して防護的役割を果 たしたこともあり、陸地への浸水はごく一部の地点 に限定された。富山県内における津波遡上高は,石 川・新潟県と比較して小さく,居住域への浸水被害 は発生していない。一方, 東側の断層と直面する新 潟県においても大きな津波痕跡高が確認された。特 に, 前面に水深の浅い領域の拡がる上越海岸におい て高い痕跡高が観測された。

#### 3.12 地域経済への影響と復興過程の調査

被災地域の地理的特性や社会経済的な背景の違い もあり、 今般の地震・津波災害による地域経済への 影響と復旧状況はこれまでわが国で発生してきた災 害と様相が異なっている。特に、 能登半島へのアク セス条件や人口減少社会の影響は、社会基盤や事業 活動の復旧の大幅な遅れに繋がっている。2023年度 の3月における地元小売業者や地場産業に関する協 同組合関係者へのヒアリングによると, ライフライ ン (特に水道) の停止, 仕入れ先の被災、地域の消 費の減少等が続いており、 なりわいの再建には至っ ていない中小の事業者が多い様子がうかがえた。こ うした事業者の中には 2007 年の地震災害やコロナ 禍の影響をなんとか耐え忍んだ事業者も多く含まれ ており, 施設に大きな被害を受けた事業者では, 事 業継続の判断が難しいケースが発生している。一方, 奥能登は酒造,輪島塗,珠洲焼,塩田,能登牛,水 産業など地域の資源を活かした魅力的な産業が集積 しており, 地域外の消費割合が高いことが特徴であ る。こうした産業を中心に地域の魅力を再度見直し

ながら,事業者のニーズを踏まえた地域内外の人的 資源の投入と柔軟な政策支援が求められる状況にあ る。2024年度は支援機関と事業者へのヒアリングを 継続し,地域経済の復旧状況と今後求められる支援 策を明らかにする。

#### 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の様子や研 究成果については報道機関等を通じて一般市民へ継 続的に情報提供された。また, 研究代表者と珠洲市 長や珠洲市, 石川県, 金沢地方気象台の防災担当者 との意見交換会を複数回実施するとともに, 石川県 防災会議震災対策部会において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 調査の成果発表の場として、日本地震学会2023年度 秋季大会での特別セッション「能登半島北東部の群 発地震とM6.5の地震」を企画し、24件の発表の内、17 件が本総合調査の関係者によるものであった。Earth, Planets, and Space 誌において Special Issue が 企画されている。さらに、令和6年能登半島地震後に 複数の機関や学協会等によって, 研究者および一般 市民向けの研究速報会が開催され, 本総合調査の研 究代表者や分担者による研究成果発表が行われた。

#### 5. おわりに

12のテーマに渡り、2023年5月5日のM6.5の地震お よび令和6年能登半島地震に関する総合調査を実施 した。2023年5月5日のM6.5の地震を含む一連の群発 地震活動は能登半島北岸沖合の海底活断層の深部延 長上で起こっていないことが明らかとなった。群発 地震活動域の南部の地下深部に流体に富む領域が存 在することが地震波速度構造や比抵抗構造から示さ れ,この流体にはマントル起源物質が混入する可能 性が温泉成分の分析から示唆された。2023年5月5日 の地震と令和6年能登半島地震に伴う地殻変動や重 力変化が測定された。地殻変動や強震波形に基づき, これらの地震の震源過程の推定が行われた。海岸で の隆起量調査により令和6年能登半島地震による地 殻変動の上下変位を推定した。地震動による被害や 地盤変状, 液状化, 津波浸水に関する調査も実施さ れ、震災像が明らかになりつつある。地域住民や地 域産業関係者へのアンケート調査やヒアリングが実 施され,令和6年能登半島地震前後の状況について把 握が進められている。令和6年度も本総合調査は継続 して実施され、現地での観測調査やさらなるデータ 解析等が行われている。

#### 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

青木賢人・林 記代美・小倉拓郎 (2024): 令和6年能 登半島地震の震災遺構と震災復興ツーリズムの提 案. 2024年日本地理学会春季学術大会【緊急公開 シンポジウム】令和6年能登半島地震.

土木学会・地盤工学会 (2007): 2007年能登半島地震 被害調査報告書,第3章「地盤の液状化」.

Frohlich C. (2001): Display and quantitative assessment of distributions of earthquake focal mechanisms, Geophys. J. Int., 144, 300-308.

https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.00341.x 藤 則夫 (1975):北陸の海岸砂丘, The Quaternary Research 14(2), 195-220, 1975.

Fujii, Y. and Satake K. (2024): Slip distribution of the 2024 Noto Peninsula earthquake (MJMA 7.6) estimated from tsunami waveforms and GNSS data. Earth Planets Space 76, 44. https://doi.org/10.1186/s40623-024-01991-z

Hirata N. and Matsu'ura M. (1987): Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonliear inversion technique. Phys Earth Planet Int 47, 50–61. https://doi.org/10.1016/0031-9201(87) 90066-5

石川県危機管理監室 (2023): 令和5年奥能登地震による被害等の状況について(第56報)【令和5年7月3日13時00分現在】

(https://www.pref.ishikawa.lg.jp/saigai/documents/202 307031300higaihou.pdf) 2024年8月24日閲覧

石川県危機管理監室危機対策課 (2024): 令和6年能 登半島地震による人的・建物被害の状況について

【 第154報 令和6年8月21日14時00分現在 】 (https://www.pref.ishikawa.lg.jp/saigai/documents/higa ihou\_154\_0821\_1400.pdf) 2024年8月24日閲覧

国土地理院 (2023):「だいち2号」観測データの干 渉解析による石川県能登地方の地震 (2023年5月5 日) に伴う地殻変動. (https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20230505noto.html) 2024年8月9日閲覧

国土地理院 (2024):「だいち2号」観測データの解析 による令和6年能登半島地震に伴う地殻変動 (2024 年1月19日更新)

(https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20240101noto\_insar. html) 2024年8月16日閲覧

栗林栄一・龍岡文夫 (1975): Brief Review of Liquefaction during Earthquake in Japan, 土質工学会 論文報告集, 15(4), 81-92.

村松郁栄・小見波正隆 (1992): 濃尾地震 (明治24年) 当時のアンケート調査回答集, 防災科学技術研究所研究資料, 155, 1-841.

森 伸一郎・三輪 滋・関 眞一(1993): 1993年2月7日 能登半島沖地震における液状化調査,第48回土木 学会全国大会講演概要集.

内閣府 (2008): 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 1858飛越地震, 2.1節 平野部の被害.

Nakahigashi K., Shinohara M., Kurashimo E., Yamada T., Kato A., Takanami T., Uehira K., Ito Y., Iidaka T., Igarashi T., Sato H., Obana K., Kaneda Y., Hirata N., Iwasaki T., Kanazawa T. (2012): Seismic structure of the source region of the 2007 Chuetsu-oki earthquake revealed by offshore-onshore seismic survey: asperity zone of intraplate earthquake delimited by crustal inhomogeneity, Tectonophysics, 562-563, 34-47. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.052

沼田淳紀・上明戸 昇・三輪 滋・池田隆明 (2007): 2007 年能登半島地震における液状化、土木学会地震工学 論文集, 29, 20-29.

Okada T., Savage M.K., Sakai S., Yoshida K., Uchida N., Takagi R., Kimura S., Hirahara S., Tagami A., Fujimura R., Matsuzawa T., Kurashimo E., Hiramatsu Y., (2024): Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm and their relation with earthquake swarm activity in the Noto Peninsula, central Japan, Earth Planets Space, 76, 24. https://doi.org/10.1186/s40623-024-01974-0 大堀道広・鈴木晴彦・岩田知孝・浅野公之・石塚

理・村田 晶 (2023): 2023年5月5日能登地方の地震 (M6.5) における珠洲市内臨時観測点の地震動記 録について、日本地震学会2023年秋季大会, S22-11.

Reasenberg P.A., and Oppenheimer D. (1985): FPFIT, FPPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, Open-File Report 85–739, US Department of the Interior, US Geological Survey. https://doi.org/10.3133/ofr85739

寒川 旭 (1986): 寛政11年 (1799年) 金沢地震によ

る被害と活断層,地震2,39,653-663.

Shinohara M., Sakai S., Okada T., Sato H., Yamashita Y., Hino R., Mochizuki K. and Akuhara T. (2022): Precise aftershock distribution of the 2019 Yamagata-oki earthquake using newly developed simple anchored-buoy ocean bottom seismometers and land seismic stations, Earth Planets Space, 74, 5. https://doi.org/10.1186/s40623-021-01562-6

東北大学・他 (2024): 令和 6 年能登半島地震について (序報),第242回地震予知連絡会 (2024年2月 29日)議事概要.

(https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/activity/242/image2 42/047.pdf) 2024年8月24日閲覧

若松加寿江・松岡昌志 (2020): 地形・地盤分類 250mメッシュマップの更新,日本地震工学会誌,40,24-27.

Waldhauser F., and Ellsworth W. L. (2000): A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault. Bull Seismol Soc Am, 90, 1353–1368.

https://doi.org/10.1785/0120000006.

Yoshida K., Uno M., Matsuzawa T., Yukutake Y., Mukuhira Y., Sato H., Yoshida T. (2023a): Upward earthquake swarm migration in the northeastern Noto Peninsula, Japan, initiated from a deep ring-shaped cluster: Possibility of fluid leakage from a hidden magma system, J. Geophys. Res.: Solid Earth,128. https://doi.org/10.1029/2022jb026047

Yoshida K., Uchida N, Matsumoto Y., Orimo M., Okada T., Hirahara S., Kimura S., Hino R. (2023b): Updip fluid flow in the crust of the northeastern Noto Peninsula, Japan, triggered the 2023 Mw6.2 Suzu earthquake during swarm activity, Geophys. Res. Lett., 50. https://doi.org/e2023GL106023

吉田 浩 (2024): 能登半島地震で目を引く家屋倒壊 耐震建築の状況は、Wedge ONLINE,1-3.

Zhang, H., and Thurber C. H. (2003): Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California, Bull. Seismol. Soc. Am., 93, 5, 1875–1889. https://doi.org/10.1785/0120020190.

## 2023 年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査の概要 一科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究令和 4 年度報告—

楠 浩一\*・青木 陽介\*・加藤 愛太郎\*・山中 浩明\*\*・ 後藤 浩之\*\*\*・阪本 真由美\*\*\*\*

\* 東京大学 地震研究所

\*\* 東京工業大学 環境·社会理工学院

\*\*\* 京都大学 防災研究所

\*\*\*\* 兵庫県立大学 大学院減災復興政策研究科

#### 要旨

2023年2月6日にトルコ南部の東アナトリア断層沿いで発生した一連の地震により、56,000人以上の犠牲者が発生した。また、構造物にも多大な被害が生じた。この災害を受けて、文部科学省科学研究費補助事業(特別研究推進費)の「2023年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査」が開始された。この総合調査では、「テーマ1.衛星測地等による地殻変動と災害把握」、「テーマ2.地震発生機構の解明」、「テーマ3.強震観測による災害発生機構の調査」、「テーマ4.災害調査による構造物被害の解明」、「テーマ5.大規模広域地震災害マネジメントとリスクコミュニケーションの解明」に取り組み、陸域で巨大な地震が発生した理由と、激甚な構造物被害や人的被害となった原因を解明する。本報では本調査の成果を概説する。

#### 1. はじめに

の被害地震が発生した。その約9時間後に、隣接する 断層においてマグニチュード7.5の地震が続発した。 これらは陸域で発生した世界最大クラスの地震であ り、およそ60,000人の尊い人命が失われ、極めて広 域で建物が倒壊し、甚大な地震災害を引き起こした。 この地震は、地震規模と被害規模の観点から、活 断層、地震活動、地震災害、構造物被害、社会防災 を包括する国際的に稀有な自然災害の研究対象とな り、その地震および災害メカニズムを解明すること は、トルコおよび世界の地震防災・減災に資すると ともに、わが国の同等あるいはそれ以上の規模の巨 大地震や地震災害について、重要な科学的・工学的 な知見を与える。そこで、文部科学省科学研究費補 助事業(特別研究推進費)「2023年トルコ南部の地 震と災害に関する総合調査」が開始された。

2023年2月6日にトルコ南部で、マグニチュード7.8

本総合調査ではトルコ南部の地震と災害に関する 学術研究を行い、陸域で巨大な地震が発生した理由 と、激甚な構造物被害や人的被害となった原因を解 明し、さらにその成果を国際的に発信することを目 としている。

本総合調査では、以下の5つのテーマに取り組み、 トルコ南部の地震と災害に関する学術研究を行う。

「テーマ1. 衛星測地等による地殻変動と災害把握」

「テーマ2. 地震発生機構の解明」

「テーマ3. 強震観測による災害発生機構の調査」

「テーマ4. 災害調査による構造物被害の解明」

「テーマ 5. 大規模広域地震災害マネジメントとリスクコミュニケーションの解明」

本報では、各テーマで得られた成果を概説する。

### 2. 衛星測地等による地殻変動と災害把握

### 2.1 合成開口レーダー衛星による地殻変動解析

本研究では、ALOS-2およびSentinel-1衛星から撮像されたSAR画像データを用いて地殻変動を抽出した。本解析では、地殻変動の計測には、標準的なSAR干渉処理に加えて、Split-Bandwidth Interferometry、Burst-Overlap Interferometry、Offset Trackingと呼ばれる応用技術も適用した(Xu et al., 2023)。これにより、断層近傍の大規模変位の計測や南北方向の変動の計測が可能となった。最終的に4方向の変位が計測され、

これらを統合的に解析することにより,3成分(東西, 南北,上下) の変動を計測することに成功した(図 -1)。

解析の結果, 地殼変動は水平成分が卓越し, 大き な上下変動は発生していないことが分かった。東ア ナトリア断層の西部は, 南側及び北側に断層帯が分 岐しているが、Mw 7.7及びMw 7.6の地震に伴う地殻 変動はそれぞれ, 南側及び北側の分岐断層帯に沿っ て分布していた。南側の分岐断層沿いには, 断層運 動に相当するとみられる変位の不連続が約350 kmの 長さにわたり確認できた。不連続は、震源付近から 東では走向約N60°Eの方向に伸びる一方,西側では Türkoğlu付近でその走向を南西方向に変えてAntakya 付近で終了していた。この分岐断層帯は幾つかの断 層セグメントで構成されていることが知られている が、変位不連続の位置から、Erkenekセグメント、 Pazarcıkセグメント, Amanosセグメントが破壊され たと推察される。これらセグメントの全てで最大5 m の左横ずれの水平変位が卓越している. 一方, Mw 7.6 の地震を引き起こしたと推定される北側の分岐断層 帯では東西約150kmにわたり変位の不連続が確認で き,最大6mの左横ずれ運動を示す。この変位不連続 は、主にCardakセグメントに沿ってほぼ一直線上に 見られるが, 東端及び西端でその走向を変えている。

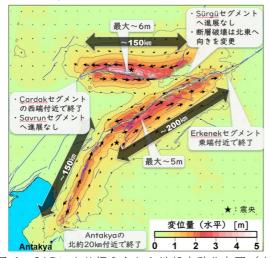


図-1 SARにより捉えられた地殻変動分布図(水平成分). 等値線は0.5 m間隔。青線は活断層を示す (Emre et al., 2013)

得られた地殻変動データをもとに、断層面上のすべり分布を推定した(図-2)。すべり分布の結果では、全ての断層面上でほぼ純粋な左横ずれの断層運動が推定された。断層面上のすべりは、両地震の断層ともおおむね10 km以浅に集中し、両断層系とも最大約10 mのすべり量が推定された。すべり分布モデルから推定されたモーメントマグニチュードは、南

側の断層系で7.82,北側の断層系で7.66であった。 Erkenek及びÇardakセグメントが各断層系で最大の 地震モーメントを放出しており、それぞれ全体の約 31%と57%に相当している。

最初の地震がÇardakセグメント上における左横ずれすべりの発生に与える影響を調べるため、推定されたすべり分布モデルを用いて静的応力変化(ACFF)を計算した(図-3)。計算の結果、2回目の地震の震源付近ではACFFが正値となり、左横ずれすべりの地震発生を促進する応力変化が生まれることが分かった。剪断応力変化と法線応力変化の成分を精査すると、震源付近では特に法線応力変化がACFFの正値に大きく寄与しており、いわゆるunclampingの効果が大きいことが分かった。

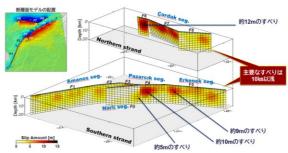


図-2 SARにより捉えられた地殻変動から推定した すべり分布モデル

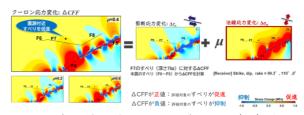


図-3 最初の地震が Çardak セグメント (F7) 上の 左横ずれ成分に対して与える静的応力変化

#### 2.2 地震により発生した斜面災害

Istanbul Technical UniversityのGörüm博士率いる研究グループは、雪解け後の高解像度衛星画像や航空写真を用いた解析および現地調査を行った結果、3600箇所以上で地すべりや斜面崩壊、落石等の斜面災害(図-4)が発生したことが判明した(Görüm et al., 2023)。また、これらの斜面災害は被災地の北部に集中していることが分かった。本研究グループでは、Görüm博士の協力のもとで、2023年6月12日から21日の間にこれらの斜面災害に対する現地調査を実施した。

調査した内容についての詳細な分析は進行中であるが、発生した斜面災害は以下の五つに大別される:(1)落石:最も多く観察された、(2)緩い層理面に

沿った岩盤の並進すべり、(3)大規模な岩盤崩壊およびそれによって形成された天然ダム、(4)再活動した大規模地すべり、(5)大規模地すべり地源頭部の上部斜面で広範に渡って発生したクラックや地盤沈下。

さらに、二つの大規模地すべりの内外において複数台の地震計を設置し、余震の観測を行った。10日間の地震観測期間において、Mw1.0—4.7の余震を1000個以上記録することができた。これらの余震観測データを用いて、地すべり地の震動特性を調べた、その一例として、地震時にIncirlic 地区で発生した大規模地すべり地において観測した地震動解析結果を図-5に示す。

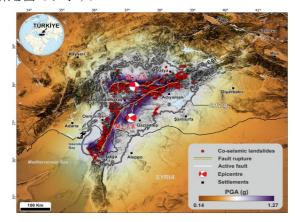


図-4 地震により発生した斜面災害分布図

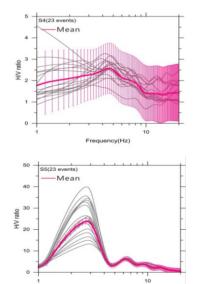


図-5 Incirlic 地区で発生した大規模地すべり地内外の卓越振動数解析結果. (a):地すべり移動土塊における観測結果; (b) 地すべり地外の山地斜面における観測結果

#### 2.3 建物被害判定 AI モデルの構築と評価

本研究では、ディープニューラルネットワークに 基づく建物被害認識を行った(Adriano et al., 2023)。 本研究では、世界中から無料で入手できる高解像度 の衛星画像を使用して,深層学習畳み込みニューラ ルネットワーク(CNN)が、画像の各部分を建物や道 路を含む7つの土地利用カテゴリを分類するように トレーニングする。トレーニングされた CNN モデル は、農村地域や人口密集地域などのさまざまな地表 環境や石積みや鉄筋コンクリート建物などの建物構 造をマッピングできる。MAXAR によって公開され た災害前後の WorldView-3 衛星画像を使用して、提 案された方法の基づき 7都市で地震により被害を受 けた建物を検出した。その結果、本研究の方法が70% 以上の精度で大きく損傷した建物や倒壊した建物を 特定したことを示している。 特に Islahiye 市では, 倒壊した建物の90%が正確に特定された。さらに、 障害物のある道路を75%の精度で識別することもで きた。この分析から得られた建物被害率の分布は、 地震による表面最大加速度 (PGA) の分布とも一致 している。被害率の高い都市は PGA の大きい地域に ある (図-6)。

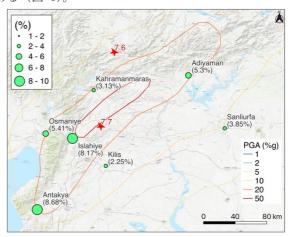


図-6 トルコ・シリア地震後の建物被害率の分布

#### 2.4 測地データを用いた地震長期発生確率

トルコ全域の地震前のInSAR時系列解析とGNSS 観測データから計算された歪速度分布(Weiss et al., 2020)に基づき、M6以上の30年間地震発生確率を0.2 度グリッドで計算した。計算手法はNishimura (2022) に準じ、歪速度データから換算した地震モーメント 速度(以下、測地モーメント速度と呼ぶ)が過去の 歴史地震による地震モーメント速度と整合するよう に、経験的な変換係数を求めた。トルコの地震カタ ログ(Tan, 2021; Rovida and Antonucci, 2021; Zare et al., 2013; GCMT)に基づく地殼内地震の累積モーメ ント速度は、トルコ南部地震の発生前の1905年-2018 年の平均で測地モーメント速度の0.52倍であり、 2023年までを含めると0.78倍となった。変換係数を 0.52、グーテンベルク・リヒター則のb値を1.0、最大 地震のMwを8.0と仮定して、ポアソン過程による30年間にM6以上の地震発生確率を図-7に示す。トルコ南部地震の震源域を含む東アナトリア断層帯沿いでは、30年地震発生確率が1-6%程度であり比較的高い場所であったが、北アナトリア断層沿いでは10%を超えていた。また、トルコ全体でもほとんどの地域で1%を超えており、同じ手法で計算した日本列島の地殻内地震の発生確率よりも全般的に高い結果が得られた。

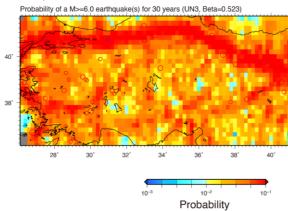


図-7 測地データ(Weiss et al., 2020)に基づく歪速 度から計算した地震発生確率(30年間、Mw6以上)

### 3. 地震発生機構の解明

グローバルな地震観測網で取得された遠地地震波を用いた滑りの時空間発展を推定し、本震Mw7.9と後続地震Mw7.6の震源過程の複雑性を明らかにした。また、トルコ国内で管理・運営されている定常地震観測網で取得された波形データを用いて、本震発生以降の地震活動に関する総合的な研究や、発震機構解の解析による東アナトリア断層帯周辺の応力場の推定、レシーバ関数による異方性構造の解析等を進めている。

### 3.1 2023年トルコ南部の地震の震源過程

本章では、本震と後続地震の震源過程に関する解析結果 (Okuwaki et al. 2023) について概説する。

#### (1) Nurdağı-Pazarcık 地震(Mw7.9)

2023年2月6日 01時17分 (UTC) に発生した本震について説明する。破壊領域の長さは350 km 程度であり、破壊継続時間は80秒程度、地震モーメントは、 $9.6 \times 10^{20}$  Nm (Mw 7.9) である (図-8)。

初期破壊は東アナトリア断層の分岐断層から開始 し、破壊開始から10秒間は、分岐断層に沿って北東 と南西方向にバイラテラル(両方向)に伝播してい る。推定された震源メカニズムの節面の一つは分岐 断層と破壊伝播方向の走向と一致する。

初期破壊終了から約5秒間の停滞期後, つまり破壊

開始15秒後に、東アナトリア断層で主破壊が開始し、約20秒間継続している。主破壊の開始点は、分岐断層との接合点より20kmほど北東側に位置しており、北東と南西方向にバイラテラルに伝播するが、非対称であり、南西方向の破壊が卓越する。また、南西側に破壊が伝播する時の破壊伝播速度は震源域のS波速度を有意に超える。初期破壊が主に北東に伝播し、主破壊が主に南西方向に伝播している。つまり逆破壊伝播現象が観測された。この逆破壊伝播現象は、他の地震でも観測されており、破壊が震源から遠ざかる方向に伝播するといった仮定は必ずしも適切ではない。主破壊の破壊伝播は、北東側・南西側ともに断層形状が不連続に変化する領域で減速する。

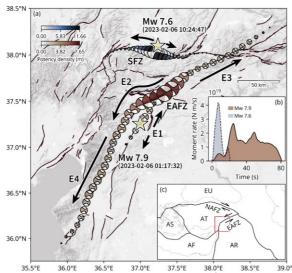
北東の遅れ破壊は、破壊開始から約35秒後に、主破壊の破壊減速域から北東に約25 kmほど離れた地点から開始し、約10秒間、非対称ではあるがバイラテラルに破壊が伝播している。推定された震源メカニズム解の節面の一つは、東アナトリア断層の走向と一致する。

南西の遅れ破壊は、破壊開始から約45秒後に、開始する。破壊開始点は明瞭ではないが、おおよそ主破壊の南西端付近であると考えられる。破壊は主に南西方向に伝播していき、約30秒間継続する。推定された震源メカニズム解の節面の一つは、東アナトリア断層の形状と近い値を有するが、わずかに時計方向に回転しており、有意な非ダブルカップル成分をともなう。この結果は、震源域南西部の断層形状の複雑性を反映していると考えられる。

Nurdağı-Pazarcık地震の破壊過程は、分岐断層での初期破壊、その後の東アナトリア断層の主破壊、断層形状が大きく変化する領域での主破壊の減速、破壊減速域からの北東・南西方向への遅れ破壊、と大きく4つのエピソードに分けることができる。本地震の成長過程は、複雑な断層形状に強く影響を受けたことが明らかになった。

#### (2) Ekinözü 地震 (Mw7.6)

次に、2023年2月6日10時24分(UTC)に発生した後続地震について説明する。得られた破壊領域の長さは80km程度であり、地震モーメントは3.2×10<sup>20</sup>Nm(Mw 7.6)である(図-8)。破壊は、非対称ではあるがバイラテラルに伝播した。破壊伝播速度は震源領域のS波速度を有意に超えている。破壊は活断層の形状が大きく変わる領域で停止しており、破壊継続時間は15秒と短い。得られた震源メカニズム解の節面の一つはスグル断層帯と一致する。モデル平面の傾斜角度は90°に設定しているが、スグル断層帯と一致する震源メカニズム解の節面の傾斜角は61°から76°と、やや北側に傾斜している。



35.5°E 36.0°E 36.5°E 37.5°E 37.5°E 38.0°E 38.5°E 39.0°E 図-8 Mw 7.9 Nurdağı-Pazarcık地震とMw 7.6 Ekinözü地震のポテンシー密度テンソルインバージョンの解析結果(図は奥脇氏提供).

#### 3.2 地震活動解析

本章では、地震活動に関する解析結果について述 べる。

#### (1) 震源再決定・速度構造推定

本震の発生以降から4月27日までに発生した地震について、トルコ災害緊急事態対策庁(AFAD)およびボアジチ大学カンデリ地震観測研究所(KOERI)による余震カタログと該当する地震波走時の読み取り値データを取得・統合し、地震波トモグラフィ法

(tomoFDD; Zhang and Thurber 2006) により, 3次元 速度構造と余震分布の同時推定を行った。

解析の結果、AFADによる震央分布に比べて、震源がより明瞭な列状分布を示すようになった。また、余震の多くは、地震時の断層すべり量(Xu et al., 2024)が大きかった場所を避けるように分布している。既往研究(Lomax 2023; Güvercin 2024)と比較すると、Mw7.9地震の震源付近の余震分布は概ね鉛直、かつ深さ5-15kmに分布して整合的である一方で、Mw7.6地震の震源域では、深さ分布にばらつきがある。これはMw7.6地震近傍の観測点の少なさが影響していると考えられ、地震発生帯の深さを検討する上で留意が必要である。さらに、構造モデルは大きな不均質を示し、特に、Mw7.6の震源断層が速度構造境界に位置するように見える。

#### (2) 包括的な地震カタログの作成

Mw7.9の地震以降の地震活動の詳細な時空間発展を明らかにするために、テンプレートマッチングによるイベント検出をおこなった。震源域周辺の地震計で収録された連続波形記録(公開データ)を取得した。テンプレートの震源情報として、AFADの地震カタログに掲載されている2023年1月~6月に発生

した地震を用いた。観測点によってはデータの欠測が生じることがあるため、36チャンネル以上の波形データが揃っている時間帯のみを検出用に使用した。その結果、Mw7.9の地震発生後の約2カ月以内において、AFADカタログの約3倍の地震を検出することに成功した。Mw7.9の震源域における余震活動のp値は、Mw7.6のp値に比べて約0.1程度大きな値に求まった。これは、Mw7.9の震源域における余震活動の減衰レートが大きいことを意味しており、Mw7.6が引き起こした負の静的応力変化の影響を受けている可能性が考えられる。

#### (3) 小繰り返し地震の抽出

International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN)による公開データを用いた繰り返し地震の抽出についてシステムの開発を継続した。この波形の類似性を用いて小繰り返し地震を抽出するシステムを,震源域に比較的近いUSGSによるM4以上の地震を対象に適用することにより,小繰り返し地震の抽出をおこなった。その結果5つの小繰り返し地震グループが抽出された。このことから,断層の一部で地震後や地震前に非地震性すべりが起きていたことが示唆される。

#### 3.3 応力場の特徴

トルコ全域で過去に発生した 2984個の地震のメカニズム解を分析して、震源域における応力場の空間変化を推定した (Yoshida 2024)。 Mw7.9地震が発生した東アナトリア断層周辺では、最大水平圧縮軸はおよそ空間的に一様で南北方向を向いているものの、鉛直圧縮応力の相対的な大きさが断層南部から北部に向かって徐々に減少する傾向が見られる。その結果、震源域南部では正断層型地震が、震源域北部では横ずれ断層地震が起こりやすい状態になっていた。空間変化のパターンは、Mw7.9と Mw7.6地震による応力変化の影響では説明できないことから、今回の地震発生前から存在していたと考えられる。

横ずれ断層である東アナトリア断層に働くせん断応力は、横ずれ断層型の応力場が卓越する北部セグメントに比べて正断層型の応力場が卓越する南部セグメントで小さくなっていたと考えられる。この東アナトリア断層帯でのせん断応力の空間変化が、2023年 Mw7.9地震時の破壊過程に影響を与えた可能性がある。先行研究によると、Mw7.9地震は東アナトリア断層とは異なる断層で開始した後、東アナトリア中央と北側のセグメントを破壊し、時間遅れを経て南側のセグメントに向かって破壊伝播した(e.g., Okuwaki et al., 2023)。せん断応力が小さかった南側セグメントにおいては、中央部と北部セグメント

の大すべりにより解放されたひずみエネルギーが加 わったことで破壊の準備が整ったのかもしれない。

#### 3.4 地殻浅部の異方性構造

地震波が速く伝わる方位は広域応力場の最大水平 圧縮軸の方向と良い対応を示すことから、地震発生 場を把握するための方法のひとつとして地震波速度 異方性構造が広く調査されている。ここでは、震源 域を含むトルコ東部周辺に設置された広帯域地震計 で収録された遠地地震波形からレシーバ関数を推定 し、その地震波到来方向依存性の調和成分を抽出、 評価する方法(Bianchi et al., 2010)を用いて地 設浅部の異方性構造(速い軸の方位)を調査した。

この地域では、GNSSデータの解析から複雑なひずみ場を形成している(Weiss et al., 2020)。これに対応するように、地殻浅部で地震波が速く伝わる方位(速い軸の方位)も狭い範囲で変化していることが分かった。東アナトリア断層帯周辺では、速い軸が南北方向を示す観測点が多い。これらの地域ではアラビアプレート北進による南北圧縮場が支配的であることが示唆される。一方、震源域周辺では速い軸が東西方向を示す観測点があり、局所的な回転の場を形成している可能性がある。東アナトリア断層の南北端に相当する2箇所の三重会合点付近では、いずれも強い異方性を有していることが分かった。

#### 4. 強震観測による災害発生機構の調査

#### 4.1 被災地域での臨時余震観測

#### (1) はじめに

2023年2月6日4時17分(現地時間)に発生したトル コ南部の地震は,東アナトリア断層帯で発生したマ グニチュード7.8の地震であり、同日13時24分には、 やや北部でマグニチュード7.5の地震も発生した。こ れらの地震によって、トルコ南部のカフラマンマラ ッシュ県やハタイ県などの広い地域で激甚な建物被 害が生じた。とくに、建物被害は、主要都市が広が る平野部や断層近傍に多く発生している。被害原因 の解明には、震源過程や平野部の地盤が強震動特性 へ及ぼす影響を理解しておくことが重要となる。こ れらの地震の震源域のいくつかの地域で比較的密な 強震観測が行われ,強震記録も得られており,震源 過程や強震動特性が明らかにされている (例えば, USGS, 2023; METU, 2023; 三宅ら, 2023)。しかし、 被災地域が広く, 既存のAFADの強震観測点のみでは, 被害と強震動特性との関係を明らかにするためには 十分ではない。

本研究では、上述の地震の被災地域であるアディヤマン県、カフラマンマラッシュ県、ハタイ県において臨時強震観測を実施し、余震による強震記録から

地震動特性を明らかにした。また、強震観測点では、 表層地盤のS波速度構造を明らかにするために微動 探査も実施した。ここでは、AFADによる強震観測と 上記の臨時強震観測で得られた記録について説明す る。

#### (2) 臨時強震観測

臨時研究観測は、2023年3月中旬~9月下旬のPhase I と9月下旬から2024年2月上旬までのPhase II に分けて行った。Phase I では、被災県の5地域の22地点で強震観測を行った。また、Phase II では、アンタキヤ周辺地域の17地点に集中して観測点を設けた。図-9には、臨時強震観測地点の位置を示す。図の赤丸は本研究の観測点を、黒三角はAFADの観測点を示す。また、長方形は、上述した2つの主要な地震の断層モデルである(USGS、2023)。各地域の観測点位置を図-10~14に示す。各地域では、被害が多い平野部の観測点に加えて、良好な地盤条件と考えられる周辺の丘陵部の基準点を配置した。

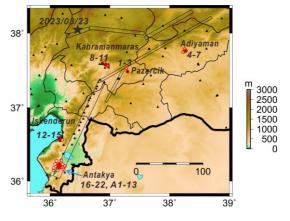


図-9 強震観測点の位置

Phase I の観測点は、次の通りである。アディヤマン県中心部では、図-10に示す4地点を設けた。カフラマンマラッシュ県では、図-11と12に示す東部のパザルジック地域と中心部に3地点および4地点を設けた。図-13には、イスケンデルン地域の観測点が示されており、既存の強震観測点を補間するように設置した。観測点12や13の周辺は、集合住宅の崩壊が多くみられた。観測点15は、南東側の山地に位置している基準点である。ハタイ県のアンタキヤ地域にも赤い△で示す5地点を設けた(図-14を参照)。そのうちの観測点19が南の丘陵地にある地点である。観測点17や22は、被害が厳しい地域にある。

Phase II では,図-14に示す青い丸印で示した17地点に観測機器を設置した。観測点のうち,4点はPhase I と同様の地点である。Phase II の観測は,アンタキタ中心部を囲むように機器を設置し,地震波干渉法を適用して,同地域の3次元地下構造モデルの推定を試みることを目的としている。各観測点では,学校

などの低層建物の最下階の床面に強震計(JEP-6A3), データロガー(LS8800), バッテリーから成る機器 を設置した。本シスステムによって1gの最大加速度 の揺れでも飽和しないために, 2V/gの感度を持つ過 減衰加速度計とした。

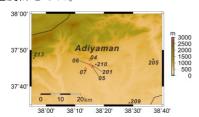


図-10 アディヤマン中心部の強震観測点(4:基準

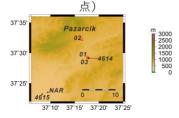


図-11 パザルジック地域の強震観測点(2:基準点)

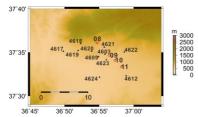


図-12 カフラマンマラッシュ中心部の強震観測点 (8: 基準点)

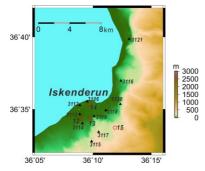


図-13 イスケンデルン地域の強震観測点(15:基準

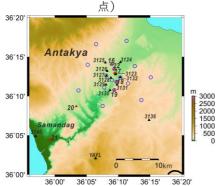


図-14 アンタキタ地域の強震観測点 (19:基準点)

#### (3) 強震記録

ここでは、Phase I での臨時観測結果を紹介する。 図-15 は、3 月 23 目 19 時 19 分(UTC) に発生した 地震(深さ13km, Mw5.3) の強震記録が示されてい る。震央の位置は、図-9星で示されている。臨時観 測点は, 震央距離数十km程度離れている。図-15は, 南北方向の加速度記録を示している。図の振幅は, 各地域の基準点(黒い横三角)の最大振幅で正規化 している。また、横軸は 4km/s で reduced した走時で ある。パザルジック地域では、基準点も含めて3地 点の波形に大きな差異はない。その他の地域では, 基準点に比べて,被災地域の観測点での波形の継続 時間は長く振幅も大きい。周期1秒~10秒の帯域の フィルター処理をした速度波形を図-15 右に示す。1 秒以上の長周期成分では,後続位相の発生がより明 確になる。とくに、イスケンデルンやアンタキヤ地 域の平野部では, 基準点に比べて後続位相の増長効 果が顕著である。

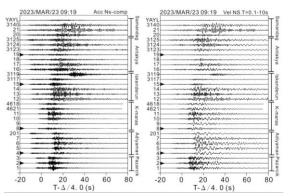


図-15 2023年3月23日9時19分の地震による加速 度記録(左)と周期1~10秒の速度記録(右)

これらの記録の基準点に対するフーリエスペクトルの比を図-16示す。パザルジック地域では、広い帯域で2地点のスペクトル比はほぼ同じであり、多くの周波数帯域で0.5-1倍である。アディヤマン地域では、3Hz以下の周波数帯域でスペクトル比は似ている。カフラマンマラッシュ県中心部では、0.3-3Hzの周波数帯域で同地域南東部の観測点(10、11)のにおいて比が大きい。ハタイ県では、イスケンデルンおよびアンタキタ地域の被災地域で0.2~2Hzの周波数帯域でスペクトル比が大きい。また、サマンダーでは、周波数1Hz付近での比が極めて大きい。

各地点の加速度記録から計測震度を計算し、基準点との震度差を求めた。図-17示すようにパザルジック地域では、各地点の震度は同程度である。一方、アディヤマンやカフラマンマラッシュ県の中心部では、震度0.5程度が被災地域で大きくなっている。さらに、ハタイ県の3地域では、基準点に比べて、被災

地域では震度が0.7-1程度大きい。図には、強震観測点付近の大破建物の割合(以下、大破率)も示されている。Adiyaman、Iskenderun、Antakya地域では、大破率と震度差と正の相関関係が認められる。

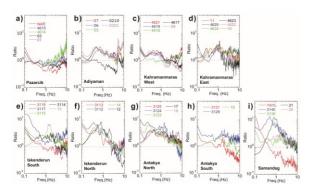


図-16 基準点に対するすべての地震記録の水平成分の平均スペクトル比

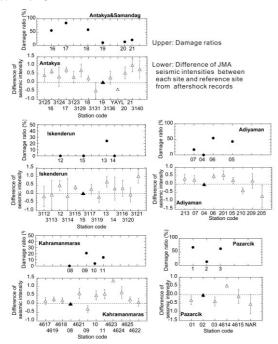


図-17 計測震度の差と利害率の関係

これらの記録の基準点に対するフーリエスペクトルの比を図-18に示す。パザルジック地域では、広い帯域で2地点のスペクトル比はほぼ同じであり、多くの周波数帯域で0.5-1倍である。アディヤマン地域

#### (4) おわりに

地域であるアディヤマン県中心部,カフラマンマラッシュ県中心部とパザルジック地域,ハタイ県イスケンデルン地域,アンタキヤ地域,サマンダー地域において2023年3月から臨時強震観測を実施し,連続記録を取得した。また,2023年9月から2024年2月までは,強震計をアンタキヤ周辺地域に集中的に配置した。余震の際に得られた強震記録から,被災地域の地震動特性を明らかにした。パザルジッ

ク地域では被災地域の地盤特性は顕著ではないと考えられる。一方, そのほかの地域では, 被災地域での地盤による増幅の影響が大きい可能性が高いことがわかった。

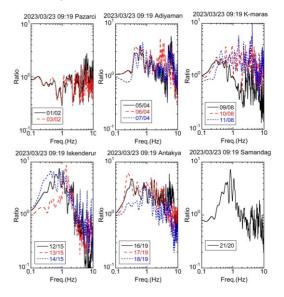


図-18の地震記録の水平成分のスペクトル比

#### 4.2 地表地震断層と建物被害の関係

#### (1) はじめに

2023年2月6日,トルコ南東部でMw7.8の地震が発生し、Reitman and others(2023)によると、この地震による地表地震断層がGobasiからIslahiyeにかけて約200km、KirikhanからAntakyaにかけて約40km出現したと考えられる(図-19)。門馬・他(2019)は、平成28年熊本地震における地表地震断層と建物倒壊率の関係を解析し、益城町では地表地震断層から100mまでの範囲における木造建物の倒壊率が60~80%と非



図-19 地表地震断層の位置 (Reitman and others(2023)の地表地震断層位置データを GoogleEarth上に赤線で表示)

常に高いことを明らかにした。本研究では、トルコ 南東部の地震における地表地震断層と建物被害の関 係を調査するため、地震発生前後に撮影された高解 像衛星画像から、地表地震断層近傍の建物被害を判 読し、地表地震断層と建物倒壊率の関係を検討した。

#### (2) 衛星画像の選定

建物被害判読に用いる衛星画像は、地上解像度50cmのPleiadesの画像とし、図-20に示す4地区を対象に、Reitman et al. (2023)の地表地震断層のトレースの左右1km程度の範囲について、地震発生前後のPleiades画像を収集した。

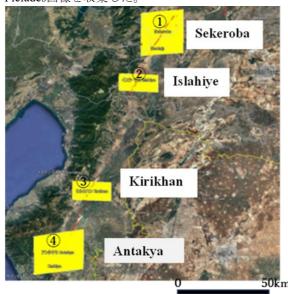


図-20 画像収集したPleiades撮影範囲(黄色)

#### (3) 判読の方法

建物被害の判読は、地震発生前後の画像を目視により比較し、表-1に示す建物被害の判読基準に従い、建物被害を5つに区分した。

被害区分	被害程度					
1	画像からは被害が確認できない					
2	建物は傾いているが原型をとどめている					
3	建物の一部が崩れ落ちている					
4	建物の半分以上が崩れ落ちている					
5	建物が完全に崩れ落ちて原型をとどめて いない、または完全に倒壊している					

#### (4) 判読結果

4地区の判読結果を図-21~24に,被害区分別の棟数を表-2に示した。

#### ① Sekeroba 地区 (図-21)

Sekeroba地区における判読した棟数は7,937棟で、このうち被害区分5の建物は549棟(判読した全棟数の約7%),被害区分4は294棟(約4%),被害区分3は1,127棟(約14%)である。建物倒壊に相当する被害区分5の空間分布については、地表地震断層に沿って連続して集中的に分布する領域と地表地震断層から離れた市街地に広く分布する領域がある。この地表地震断層に沿って連続して集中的に分布する領域(図-16のAとB)に限定し、地表地震断層から水平距離別の区分5の占める割合を調べたところ、地表地震断層から100m以内では約11%であり、判読した全棟数に占める割合よりも高いものであった。

#### ② Islahiye 地区(図-22)

Islahiye 地区における判読した棟数は 5,218 棟で、このうち被害区分 5 の建物は 196 棟(判読した全棟数の約 4%),被害区分 4 は 21 棟(1%未満),被害区分 3 は 116 棟(約 2%),被害区分 2 は 3 棟(1%未満)であり,被害区分 5 の比率は Sekeroba 地区の約半分である。建物倒壊に相当する区分 5 の空間分布は,広く散在して分布する。地表地震断層と建物被害の関係を見ると,地表地震断層近傍にはごく少数の建物があるが,これらの建物は全て被害区分 1 の建物で、被害区分 5 の建物はない。

#### ③ Kirikhan 地区 (図-23)

Kirikhan 地区における判読した棟数は 12,017 棟で、このうち被害区分 5 の建物は 476 棟(判読した全棟数の約 4%)、被害区分 4 は 95 棟(約 1%)、被害区分 3 は 662 棟(約 6%)、被害区分 2 は 6 棟(1%未満)であり、被害区分 5 の比率は Sekeroba 地区の約半分である。建物倒壊に相当する被害区分 5 の空間分布は、広く分散して分布するものの、一部集中して分布するところもある。地表地震断層と建物被害の関係を見ると、地表地震断層近傍には建物は極めて少なく、またこれら建物は全て被害区分 1 の建物で、被害区分 5 の建物はない。なお、被害区分 5 の建物が集中して分布する所は、北側の地表地震断層と南側の地表地震断層を繋いだ延長線上に隣接している。

### ④ Antakya 地区 (図-24)

Antakya 地区における判読した棟数は31,650 棟で、このうち被害区分5の建物は2,001棟(判読した全棟数の約6%),被害区分4は170棟(約1%),被害区分3は368棟(約1%),被害区分2は39棟(1%未満)であり、被害区分5の比率はSekeroba地区と同様である。Antakya地区には地表地震断層が出現していないが、今回の地震で特に建物被害が大きかった地区のひとつである。被害区分5の空間分布を見ると、特にAntakyaの中心市街地付近に集中して分

布しており、断層に沿うような線上に連続して分布 する傾向は読み取れない。

表-2 判読区分別棟数 (0%表示は1%未満を含む)

判読区分	Sekero	ba地区	Islahiye地区		Kirikhan地区		Antakya地区	
十分的企力	棟数	比率	棟数	比率	棟数	比率	棟数	比率
1	5, 967	75%	4, 882	94%	10, 778	90%	29, 072	92%
2	0	0%	3	0%	6	0%	39	0%
3	1, 127	14%	116	2%	662	6%	368	1%
4	294	4%	21	0%	95	1%	170	1%
5	549	7%	196	4%	476	4%	2, 001	6%
合計	7, 937	100%	5, 218	100%	12, 017	100%	31, 650	100%

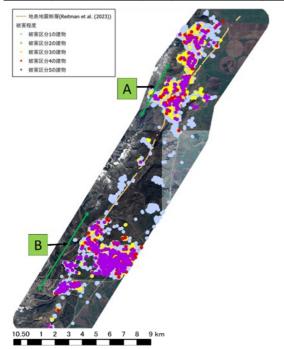


図-21 Sekeroba地区判読結果

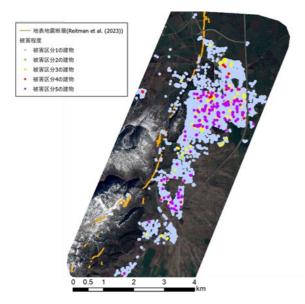


図-22 Islahiye地区判読結果

#### (5) まとめ

トルコ南東部の地震において地震発生前後に撮影された高解像衛星画像から、地表地震断層近傍の建物被害の判読を行い、地表地震断層と建物被害の関係を検討した。検討の結果から、Sekeroba地区では地表地震断層の近傍では倒壊率が高い傾向があり、地表地震断層が建物被害に影響を与えた可能性がある。一方、Islahive地区及びKirikhan地区では、地表地震断層近傍の倒壊建物は確認できないが、地表地震断層近傍の建物数自体がSekeroba地区と比べると圧倒的に少ないため、データの解釈には注意が必要と考える。

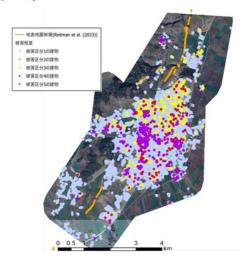


図-23 Kirikhan地区判読結果

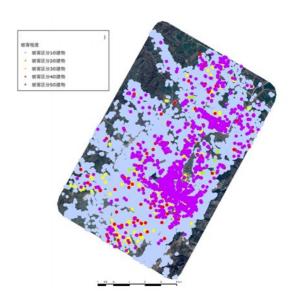


図-24 Antakya地区判読結果

#### 5. 災害調査による建築構造物被害の解明

日本建築学会、土木学会、地盤工学会と相談のうえ、4団体合同で調査団を派遣することとした。また、第一回目の調査日程を3月28日~4月4日とし、

調査団団長を楠とすることとした。

調査の目的は、イスタンブール工科大学 (Istanbul Technical University, 以下 ITU) の Alper Ilki 教授との情報交換を踏まえて、主として次の 6 点とした。

- 1. 強震観測点周辺の被害状況調査
- 2. RC 造建物、鋼構造建物、組積造建物、免震・制 振建物の被害概要調査
- 3. 病院・工場の事業継続に関する調査
- 4. 歴史建造物の被害調査
- 5. 地盤被害調査
- 6. トルコの建築関係の法令とその実態、および復 興計画調査

#### 5.1 RC 造建物の被害状況

RC 造建物の調査地域を図-25 に示す。調査地域は 1度目の地震の震源を中心として、その北東から南 西へ350km 超に及ぶ。すべての地域で甚大な被害が 見受けられた。なお、トルコの耐震規定は、最近で は、1999年、2007年、および 2018年に改訂されて いる。

トルコの建物の特徴として、非常に扁平率の高い柱が用いられている事である。所要の曲げ強度を確保するため、特に1階の柱脚で配筋が多い。さらに、脚部で主筋が重ね継ぎ手されているため、主筋の空きが極めて狭いものが建設年代によらず被害建物では多く見られた(写真-1)。

また、写真・2 に示すようなパンケーキ破壊を生じた建物も多くの都市で散見された。建物によっては、2度目の地震で倒壊したとのことであった。2018 年以降の建物では、全体崩壊形を形成したものの巣の応答変形が極めて大きくなったと思われるものや、建物脚部から転倒したもの(写真・3)も見受けられた。



図-25 調査対象都市



写真-1 柱脚重ね継ぎ手部(İskenderun)



写真-2 パンケーキ状に破壊した建物 (Antakya)



写真-3 転倒した建物(İskenderun)

#### 5.2 RC 造建物の詳細調査

建物被害が多く見られた 5 県において, 25 棟の RC 造建物を対象に, 寸法計測や被災度区分判定等の詳 細調査を実施した (大破 10 棟, 中破 6 棟, 小破 3 棟, 軽微 4 棟, 無被害 1 棟, 精査中 1 棟)。

一例として Antakya で建設中であった4棟の集合住宅の例を示す。4棟とも平面計画は同じで、構造部材の寸法・配筋も同じと思われる。A 棟は BF1+11 階建てで、脚部から転倒倒壊した。B 棟は BF1+12 階建てで、1層が層崩壊した。C 棟は13 階建てで、その被害状況から全体崩壊形を形成したものの、南側に大きく傾斜し、残留変形角は最大で6%近くに及んでいる。D 棟は8階建てで、被災度区分判定の結果、中破となった。

写真-4 に倒壊した A 棟、写真 5 に C 棟の建物全景と、一例として梁の被害を示す。梁は曲げ降伏後のせん断破壊とみられる被害が多数みられ、非常に大きな変形を経験したと考えられる。図-26 に各部材の被災度を示す。図には、1 階の Y4 軸上の柱で計測した残留変形角も示している。X4-Y4 柱で、南側に 6.2%の残留変形角を生じていた。図からもわかるとおり、梁の被災状況が激しく、建物の被災度区分は大破となった。



写真-4 13 階建て集合住宅(Antakya)





写真5 13 階建て集合住宅(Antakya)

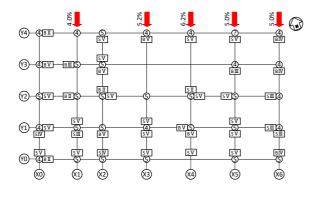


図-26 被災度判定結果(○は柱の被災度で曲げ、□ は梁の被災度でB:曲げ、S:せん断)

#### 5.3 耐震設計の留意点

ここでは、トルコ側とも合同で建物の現地被害調査を実施した結果、得られた耐震設計上の留意点を下記に示す。

- 1. 古い建物を中心に層崩壊を生じている建物が 多く、今後耐震補強などにより解消していく必 要がある。
- 2. 柱の形状が極めて扁平で、下階でも柱幅が大きくなっていない建物が多い。その結果、配筋が 過密配筋となっており、付着割裂破壊を生じて いるものが多い。今後、最大主筋量などの規定 が必要であろう。
- 3. コンクリート打ち継ぎ部のコールドジョイントや、梁主筋の定着がコアコンクリート外にされているなど、不適切な例が散見された。施工品質の向上が望まれる。
- 4. あまり伸びずに破断している鉄筋が見られた。 鉄筋の品質を再確認する必要がある。
- 5. 最新の耐震規定で設計された建物では、計画通りに全体降伏形を形成している建物が多かった。ただし、設計用地震荷重を超えるレベルの振動であったこともあり、想定以上の変形を生じた建物がいくつかある。近代耐震設計法に則って設計された建物が想定以上の振動を受けた場合の挙動について、今回の実被害をさらに詳細に検討する必要がある。

## 5.4トルコで建築構造物の被害が出続けている 理由の調査

個々の構造物の被害メカニズムの調査は、耐震性能の高い構造物を実現する上で不可欠である。しかし、研究実績も耐震基準も有するトルコで、地震のたびに多くの構造物が被災し、多数の死傷者が出続けている原因を把握しなくては、上で述べた調査成果も将来の被害軽減につながらない。そこで、建物が建設・利用されるまでのプロセスや環境を文献調査と現地でのインタビューによって調べ、脆弱な構造物が建てられ続けている原因を探った。

トルコの耐震基準は他国と比較して大きな問題はないが、これに準拠した構造物が適切な場所に建設されない理由は何か。トルコには建築許可の手続きも建築検査に関する制度(Guler D et al., 2021)も、さらに地震リスクや地盤条件に基づく土地利用制限(Official Gazette, 1985)も存在し、これらに従わない建物は建築できないし、竣工後には利用できないことになっている。強制地震保険制もある。しかし、実際には違法な建物が多数存在している。例えば、今回の被災地で、2013年度に竣工した建物の約90%が許可を取得しておらず、震災後の現在でも約40%は従っていない。

この背景には、建築許可や建築検査を実施する人 員不足、制度を確実に準拠させる仕組みの欠如、さ らに土地利用制限に関しては、大統領選挙をはじめ、 各種の選挙前の公約によって、政治的な理由から、 ゾーン恩赦として不適切なエリアにも建物の建設許 可が出てしまう。これらの課題を解決しないことに は、災害に強い建物や都市の実現は困難である。

#### 6. 災害調査による土木構造物被害の解明

#### 6.1 Iskenderun • Golbasiにおける地盤被害

Iskenderun市街地の地図を図-27に示す. 同図にはかつて海上にあった灯台の位置を示すが、これより海側の地域は近代の埋立地盤である. また、Iskenderunでは2月6日地震発生直後に街区が海水の侵入により浸水したことが報告されており、調査時においても前日の降雨により広い街区で浸水が確認された. 図には調査した3/31時点における浸水範囲を示すが、浸水は埋立地と考えられる地域を中心に分布しており、特に海岸通りの商店街は3/31時点でも約30cm程度浸水したままであった. また、浸水域内やその周辺では噴砂の痕跡や歩道の隆起が確認された.

図-28は海岸埋立地の様子である.周辺には地盤の側方流動による数十cm程度のクラックがいくつも確認され、噴砂も多く確認されたことから、海岸地域で発生した地盤沈下は液状化によるものと考えられる.図中のDP-3地点で実施したPDCPTによるNSPTの深度分布と、SW-1で実施した表面波探査によるせん断波速度Vsの深度分布を図-29に示す.PDCPTはGL-4.0mまで実施し、地下水位はほぼ地表面に存在していた.表層のNSPTは5未満と非常に低く、GL-1から2m程度までは5-10回と少し高くなったが、それ以深は5程度を示す緩い地盤であった。また、表層部分のVsは150m/sec以下であったが、GL-10m程度まで徐々に増加して190m/sec程度となり、この深度まで液状化が生じた可能性がある.



図-27 Iskenderun の地図と液状化に伴う被害の様子

人口3.5万人程度の小さな街Golbasiでは、液状化の発生とそれに伴う地盤支持力の低下により多くの構造物に沈下・傾斜被害が発生した。図-30に示すよ

うに、Golbasiの市街地はGolbasi湖の南側に発展しており、緩い湖成堆積物が厚く堆積していること、およびほとんどの構造物が直接基礎であったことが被害の原因と考えられる。同図に示す完全に転倒した中層構造物の基礎の厚さは約0.8mでありGolbasi市街地の中層構造物のほとんどはこれと同様の直接基礎であったと考えられる。このような支持力不足に起因する構造物の不同沈下は、幹線道路(D360)の湖側の点線で囲ったエリアで数多く発生した。また、このエリアでは構造物だけでなく水路の擁壁の転倒や鉄道線路の不陸も生じていた。



図-28 Iskenderun の海岸埋立地の液状化被害

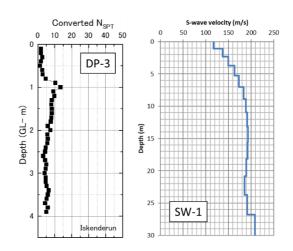


図-29 簡易動的コーン貫入試験と表面波探査結果 (Iskenderun)

図-31は4/1の調査時において確認された被災構造物のうち最も大きく傾斜した建物であり、隣の建物に寄りかかった状態であった。また、この建物の持ち上がった基礎部で確認された地下水位はGL-1m程度であった。同図はUAVにより北西方向に撮影したものであるが、同写真の視界に入る凡そほとんどの中層構造物は顕著な不同沈下被害を受けている。

図-32は幹線道路沿いにおいて大きく沈下・傾斜した構造物の脇で実施したPDCPT (PD-4) と表面波探査 (SW-2) の結果である. NSPTはGL-3m程度まで5以下と非常に緩く, その後徐々に大きくなる傾向が確認された. 一方, Vsの値GL-7m程度まで130-140 m/sec

と非常に低い値を示し、その若干増加するものの、GL-20から25m程度まで緩い地盤が連続する傾向が確認された.PDCPTと表面波探査の位置が多少離れていたため多少結果が異なるが、表層の非常に緩い地盤において生じた液状化と支持力の低下により、直接基礎の構造物に大きな沈下と傾斜が生じたと考えられる。また、PDCPTと表面波探査により表層の軟弱地盤の層厚を確認したが、その層厚は湖に近づくほど厚くなる可能性も考えられる。



図-30 Golbasi で生じた液状化被害と分布



図-31 大きく傾斜した構造物 (手前の白い建物)

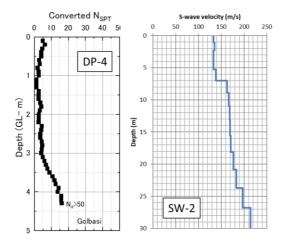


図-32 簡易動的コーン貫入試験と表面波探査結果 (Golbasi)

#### 6.3 斜面崩壊

Antakyaの南東約7kmに位置するTepehanにおいて大規模な斜面崩壊が発生した.地すべりの全景を写真-6に示す.地すべりの全長は約500m,幅は100~150m程度である.当該地の基盤は比較的脆い石灰岩であり、その岩片からは魚類の化石も確認された.また舌端部には崩壊土砂が堆積して原地盤より5m程度高くなると共に、小さな天然ダムを形成していた.

写真-6には、UAV測量により得られた主側線の地表 面標高も示すが、この断面からも分かるように、 Tepehanの地すべりの特徴の一つはその斜面勾配で ある. 被災地を取り巻く丘陵地は全体になだらかで あり、崩壊部の勾配も約4度であった.これは、一般 的な地震地すべりの斜面勾配と比較すると非常に緩 い. また、滑落崖から約100mまでは深度約10~15mの 沈降帯が見られ、崩壊・移動した土塊は元の形状を 残していることも特徴的である.これらの特徴は 2008年岩手・宮城内陸地震で発生した荒戸沢地すべ りとも類似しており、そのメカニズムとして深部に おいて地表面と並行する弱層が存在し, これが地震 動により軟化して上部の土塊をそのまま滑動させた 可能性が考えられる.また,崩壊部は周辺と比べてや や表面水が集まりやすい地形となっていたことから, すべり面に液状化を引き起こす十分な地下水が供給 されていた可能性も考えられる.

Tepehanの地すべりは今回の地震を引き起こした断層の延長線上に位置しており、地すべりブロックには直線状の溝が確認された.この溝は断層方向とも合致するだけでなく、他の断層の観察でも見られた左横ずれのパターンとなっていた.このため、Tepehan地すべりの発生は断層運動の影響を受けた可能性も考えられるが、今回の調査ではその関連性は解明できていない.



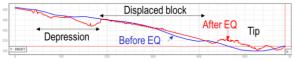


写真-6 Tepehan地すべりとUAV測量による主側線の地震前後の地表面標高

## 7. 大規模広域地震災害マネジメントとリスクコミュニケーションの解明

#### 7.1 災害対応

災害対応と被災者支援については、2023年4月15日~25日に現地調査を実施した。トルコではマルマラ地震までは日本同様に災害対応における地方政府の役割が大きく、中央政府の災害対応は内務省市民防衛総局(GDCD)が、また地震防災対策は公共事業・住宅省地震総局(GDDA)が統括していた。しかしながら、マルマラ地震では地方政府が被害を受けたことに加え、防災機能が各省に分散されているため国全体の災害対応を統括することが難しかったそこで、マルマラ地震後には国の災害対応を統括する新たな組織として首相府緊急事態総局(TEMAD)が設置された。さらに2009年には、GDCD、GDDA、TEMADが統合されAFADが設置された。

現在ではAFADを中心に防災対策が進められており、2014年にはトルコ国家災害対応計画(TAMP)が策定された(2022年に更新)(The Government of Türkiye, 2023)。

今回の地震発生後、AFADは即座に非常事態宣言を 10県に発令した(非常事態宣言対象県はその後11県 に拡大)。AFADは職員及び内務省の幹部職員を被災 地に派遣し、被災地の災害対応の支援にあたった。 災害発生から3月1日までに派遣された職員は、AFAD 幹部職員38名、県知事38名、郡長,68名、地方自治体 幹部職員160名であった(AFAD, 2023)。

被害が大きかったハタイ県の災害対策センターで 広域支援の実施状況を確認した(写真-7)。被災者 支援業務は「清掃」「風呂・トイレ」「物資」「運 営」「廃棄物」に細分化され、部門ごとに支援担当 自治体が割り当てられていた。「清掃」部門長は、 トルコ北東部のシノップ県の郡長であり、内務省と の調整により1ヶ月間避難所の清掃業務の統括業務 にあたっているとのことであった。災害発生直後よ り活発な広域支援が行われていることが伺えた。



写真-7 ハタイ県災害対策センター

#### 7.2 避難所と被災者支援

日本では、災害時には学校や体育館等の公共施設が 避難所として利用されるが、トルコでは避難所は指 定されておらず被災者にはテントが提供される。公 園等には複数のテントが並ぶテント村(Çadır Kent) が開設された。テント村は被災11県に332カ所開設さ れ、358,037名が避難した(AFAD, 2023)。

震源近くに位置するパザルジュック県ナルルのテント村は地震から3日後にAFADにより設置され、調査時点では95世帯が暮らしていた(写真-8)。テントは世帯ごとに提供されており、生活用品(ベッド・マットレス・調理器具・絨毯・ストーブ等)が整備されていた。これらの支援は、AFADが被災者のニーズを確認し調達・提供されたものであった。テント村にはシャワーやトイレとして専用のプレハブが建てられていた。また、小学校・中学校・幼稚園として大型のテントが設置されていた。テント村には安全管理のため軍が常駐しており、生活環境は良好であった。AFADは主としてテント村の開設と管理運営、被災者への物品の提供を行なっており、被災者への食事の提供はトルコ赤新月社(TRC)が行なっていた。



写真-8 テント村の様子

なお、これらのテント村とは別に市内の随所にテントが設置されていたが、その多くは被災したシリア人が自宅敷地内に設置しているものであり、シリア人とトルコ人とでは支援状況は異なっていた。 欠である。

## 7.3 「8月17日」から「2月6日」へ: 震災の教 訓と課題

ハタイ県を中心に被災者や民間の支援団体,自治体 担当者らにインタビューを行った。その結果,地域 ごとに震災直後の救援活動,支援活動における政府 と自治体・市民団体の連携,長期的な避難生活にお ける被災者の状況等に差異があることが明らかにな った。概して政府系機関であるAFADによる被災者支 援や家を失った被災者の仮設住宅への移動はスムー ズだったが、インフラを含めて被害が甚大であった 地域においては被災した市民自身や市民団体の積極 的な活動が目立った。

### 7.4 地震前後での情報リテラシーの変化

カフラマンマラシュ地震後の行政や学生の防災意識の変化を調べるために行政職員及び学生を対象にインタビューとアンケート調査を2024年10月4日~6日に実施した。調査は(ガジアンテップ、カフラマンマラシュ、ハタイ)を訪問して実施した。

アンケート調査内容については主として震災前後 の防災意識の変化や今後の重要課題等である。アン ケートは以下の大学の学生と行政職員を対象に実施 した。

表1 アンケート回答数

	回答数
Kahramanmaras Univ • Gaziantep Univ.	86 組
Kahramanmaras Municipality	5 組
Kahramanmaras Metropilitan Municipa	ality 7組
Hatay Municipality	3 組
Gaziantep Metrpolitan Municipality	4組
Gaziantep CUDBB	4組

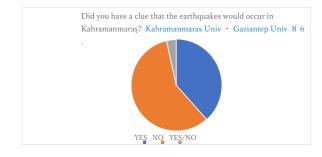


図-32 地震が起こると思っていたか (大学生)

カフラマンマラシュとガジアンテップの大学でのヒアリング・アンケートでは、60%を超える学生が地震リスクを認識していないという回答であった(図-32)。

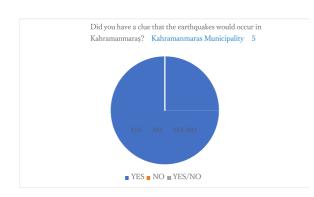


図-33 地震が起こると思っていたか(市役所)

これに対し、カフラマンマラシュ市役所でのインタビュー・アンケートでは、参加したほとんどの職員は地震リスクを認識していた(図-33)。 以上の結果からは、今後の課題としては如何に市民への地震リスクの周知・啓発していくのかが挙げられる。

甚大な被害が発生したハタイ県アンタキヤの行政機関でインタビューでは、回答した所長が住んでいた10階建ての新しいマンションは4棟あった。1回目の地震で3棟が倒壊し、自身が住んでマンション1棟のみが残ったが2回目の地震で倒壊し、命だけは守ることが出来たとの話出会った。震災直後に甚大被害の要因の一つとされた耐震化が不十分な古い構造物だけでなく、新規の構造物でありながら設計ミスを含めた不適合構造物も多く存在していたことも実感した。

インタビュー・アンケートの調査結果の概要を以下 に示す。

- ① 震災前の意識:一部行政では地震リスクは認識されていたものの多くの大学生の地震リスクの認識は高くなかった。行政の意識と大学生,市民と認識に温度差があったと推察される。
- ② 震災前の対策:一部行政には耐震化の必要性の 認識はあったものの、大学生は何もしていない との回答が40%あった。行政にくらべ大学生や 市民は地震リスクに対する認識は低いことか ら十分な具体的な対策には至っていない。
- ③ 震災後の認識:行政,大学生とも防災認識が高まった。
- ④ 震災後の対策:行政,大学生とも特に耐震化, ハザードマップ確認,備蓄など防災対応が進ん だが,これをどのように継続していくことが課 題である。
- ⑤ 今後の地震防災に必要な課題:行政,大学生とも耐震化,訓練,防災教育などが挙がっており,これが一般市民にも普及し,被災地のみならず,危惧されている想定マルマラ地震震源域の行政・市民へも展開する必要がある

#### 7.4 7章のまとめ

7章の検討から明らかになった点を以下に示す。

- ・ 1999年の地震の経験を踏まえて構築された AFADを中心とした災体制により、迅速な対応方 針の決定、財政措置、人的・物的資源マネージメ ントが行われていた。復興事業も、AFADが統括 する体制が構築されていた。
- 住宅再建については、マルマラ地震後に地震保険の仕組みが整備されていたものの、インフレの影響により上手く機能していないところもあった。

地元で住宅を確保することを基本に、現地再建 (再建費用のローン) 20年(2年間支払い猶予), 市場価格の6割程度で公団による復興住宅提供 が行われていた。現地再建においては半壊の建物 の修理・新築再建ということの決定が課題となっ ている。

- ・ 被災者支援は、地域ごとに差異があることが明らかになった。概してAFADによる被災者支援や家を失った被災者の仮設住宅への移動はスムーズだったが、被害が甚大であった地域においては被災した市民自身や市民団体の積極的な活動が目立った。
- ・ 地震前後のリスク認識調査では、一部行政職員は 地震リスクを認識していたものの、大学生のリス ク認識は低いことが示された。また、耐震化に対 する意識も学生は低く、行政と大学生・市民との リスク認識に温度差があった。

#### 7.4 7章のまとめ

7章の検討から明らかになった点を以下に示す。

- ・ 1999年の地震の経験を踏まえて構築された AFADを中心とした災体制により、迅速な対応方 針の決定、財政措置、人的・物的資源マネジメン トが行われていた。復興事業も、AFADが統括す る体制が構築されていた。
- ・住宅再建については、マルマラ地震後に地震保険の仕組みが整備されていたものの、インフレの影響により上手く機能していないところもあった。地元で住宅を確保することを基本に、現地再建(再建費用のローン)20年(2年間支払い猶予)、市場価格の6割程度で公団による復興住宅提供が行われていた。現地再建においては半壊の建物の修理・新築再建ということの決定が課題となっている。
- 被災者支援は、地域ごとに差異があることが明らかになった。概してAFADによる被災者支援や家を失った被災者の仮設住宅への移動はスムーズだったが、被害が甚大であった地域においては被災した市民自身や市民団体の積極的な活動が目立った。
- ・ 地震前後のリスク認識調査では、一部行政職員は 地震リスクを認識していたものの、大学生のリス ク認識は低いことが示された。また、耐震化に対 する意識も学生は低く、行政と大学生・市民との リスク認識に温度差があった。

#### 8. まとめ

本報では、文部科学省科学研究費補助事業(特別

研究推進費)の「2023年トルコ南部の地震と災害に 関する総合調査」の成果を概説した。

「テーマ1. 衛星測地等による地殻変動と災害把握」においては、「だいち2号」など様々な衛星画像を用いて、トルコ南部の地震による地殻変動の推定と災害把握を行う。また、東アナトリア断層帯の震源域の活断層および斜面災害調査を行い、連動型地震と災害の発生メカニズムを解明する。

「テーマ2. 地震発生機構の解明」においては、 複雑な断層系における総合的な学術調査を実施した。 Mw7.9の地震は、東アナトリア断層の分岐断層から開 始し、主破壊の伝播方向の反転やS波を超える破壊伝 播速度など、特筆すべき点の多い震源過程であった。 Mw7.6の断層破壊は、スグル断層沿いにバイラテラル 且つS波を超える速度で伝播し、活断層の形状が大き く変わる領域で停止した。さらに、震源断層は複数 の高角傾斜の断層面から構成され、複雑な分布を示 す。余震活動は、大すべり域の周辺で主に発生する 傾向が見られ、地震活動の減衰速度はやや高めであ った。応力場は、震源域北部・中部では横ずれ場が 卓越するが、震源域南部で正断層場へと変化し、異 方性構造から示唆される回転運動との関連性が考え られる。断層の一部において非地震性すべりが起き ている可能性があり、今後は、測地データから推定 されたクリープ運動との関係を明らかにして長期的 な変動を理解することが重要である。

「テーマ3.強震観測による災害発生機構の調査」 においては、余震活動が活発なうちに、被害地域の 強震観測点を補強するように臨時観測を行い、地盤 条件が空間的に複雑に変化する平野部での地震動特 性を評価し、地震被害発生機構を明らかにした。震 源特性に加えて,被害地域では,平野部の地盤増幅 によって地震動が大きくなったことがわかった。と くに, アンタキヤ地域やカフラマンマラシュ中心部 でっは、周期1秒以上の成分での増幅が大きい。これ らの効果は、わが国の平野部でも観測されており、 地震動予測では、浅部地盤と深部地盤の両者の影響 を考慮することが重要であると考えられる。また, 今回の地震発生前後に撮影された高解像衛星画像か ら, 地表地震断層近傍の建物被害の判読を行い, 地 表地震断層と建物被害の関係を検討した。検討の結 果から, Sekeroba地区では地表地震断層の近傍では 倒壊率が高い傾向があることがわかった。一方, Islahive地区及びKirikhan地区では, 地表地震断層 近傍の倒壊建物は確認できないが, 地表地震断層近 傍の建物数自体がSekeroba地区と比べると圧倒的に 少ないことも考慮する必要はある。

「テーマ4. 災害調査による構造物被害の解明」 においては、建築・土木・地盤工学等の観点から、 トルコ南部の地震により極めて広い範囲で建物が倒壊し、甚大な地震災害が引き起こされた原因を総合的に検討した。また、建物の被害を調査し、今後の耐震規定の修正点として、トルコ側と協議してまとめた。さらに、日本では事例の少ない断層変位や地すべり、液状化等の地盤変状が構造物およびライフラインに及ぼした影響を調査し、巨大地震に対して強靭な社会システムを実現するための資料とする。

「テーマ5.大規模広域地震災害マネジメントとリスクコミュニケーションの解明」においては、大規模広域地震災害における災害対策マネジメントの特質と課題を解明するとともに、地震防災教育プログラムと減災リスクコミュニケーションのあり方を検討した。そして、今回の地震から得られる災害対応における民間組織との連携や、地震リスク認識の地域間格差等の問題については、国際プロジェクト(SATREPS地球規模課題対応国際技術協力プログラム)等を通して、トルコの人々とともに改善のための仕組みづくりに取り組む予定である。

#### 参考文献

Adriano, B., Miura, H., Liu, W., Matsuoka, M., Portuguez, E., Diaz, M., and Estrada, M. "Revising the 2007 Peru Earthquake Damage Monitoring Using Machine Learning Models and Satellite Imagery," *Journal of Disaster Research*, **18**(4), 379-387

AFAD, Press Bulletin-36 about the Earthquake in Kahramanmaraş, 01.03.2023

Emre, Ö., Duman, T.Y., Özalp, S., Elmacı, H., Olgun, Ş., and Şaroğlu, F. (2013): Active fault map of Turkey, Special Publication, Series 30, General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA), Ankara, Turkey.

IFRC, Türkiye Earthquake, OperationUpdate #2,21/04/2023.

Nishimura, T. (2022), Time-independent forecast model for large crustal earthquakes in southwest Japan using GNSS data, Earth Planet. Space, 74, 58, doi:10.1186/s40623-022-01622-5.

The Government of Türkiye, Türkiye Earthquakes Recovery and Reconstruction Assessment, 2023.

Weiss, J. R., Walters, R. J., Morishita, Y., Wright, T. J., Lazecky, M., & Wang, H., et al. (2020): High-resolution surface velocities and strain for Anatolia from Sentinel-1 InSAR and GNSS data, Geophys. Res. Lett., 47, e2020GL087376, doi: 10.1029/2020GL087376.

Xu, L., Aoki, Y., Wang, J., Cui, Y., Chen, Q., Yang, Y.,

and Yao, Z. (2023), The 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6 earthquake doublet in SE Türkiye: coseismic and early postseismic deformation, faulting model and potential seismic hazard, *Seismological Research Letters*, 95, 562—573, doi:10.1785/0220230146

Yoshida, K. (2024): Spatial variation in stress orientation in and around Türkiye: rupture propagation across the stress regime transition in the 2023 Mw 7.8 Kahramanmaraş earthquake. Geophysical Journal International, 238 (3), 1582–1594, https://doi.org/10.1093/gji/ggae230.

金田義行: SATREPSにおける地震防災分野の国際協力—SATREPS トゥルキエの研究概要—

日本地震工学会誌 第48号 P9-12 2023

#### 謝辞

本地震で亡くなられた方々に弔意を、また被災された方々にお見舞いを表します。

本研究の一部では、KOERI、AFADならびにドイツポ ツダム地球科学研究センターが設置し、公開してい る広帯域・短周期地震計記録を解析に用いました。

本研究では、科研費特別研究促進費 (22K21372) のほかに、国際共同研究加速基金 (国際共同研究強化(B)) (21KK0075)、全国耐震ネットワーク委員会および日本建築センターからも補助して頂きました。

本調査の一部は、日本建築学会、土木学会、地盤工学会、日本地震工学会の調査団と共同で実施したものです。本調査においては、KOERIデータの取得・整理においてDogan Kalafat博士、AFAD・Tatar教授、中東工科大学・Albayrak氏、は森伸一郎先生(愛媛大学),小山真紀先生(岐阜大学),村上ひとみ先生(山口大学),Nurcan Meral Özel先生(ボアジチ大学),Dilek Kepekçı氏のご協力を頂きました。また、在トルコ日本大使館、国際協力機構、国土交通省、トルコ環境都市化気候変動省、イスタンブール工科大学をはじめとするトルコの各大学の研究者各位、トルコ首相府防災危機管理庁(AFAD)等、沢山の方々のお世話になりました。ここに感謝の意を表します。

# 2023年能登半島沖の地震で発生した地震動と建物被害の対応

汐満 将史\*・中澤 駿佑\*\*・境 有紀\*\*\*

- \* 山形大学
- \*\* 宇都宮大学
- \*\*\* 京都大学防災研究所

## 要旨

2023年5月5日に発生した能登半島沖の地震において、震度5強以上を記録した強震観測点の建物被害調査を行い、発生した地震動の性質との対応性について検証した。被害調査の結果、K-NET正院周辺で全壊した建物が複数見られ、木造全壊率は10.5%に達したが、その他の観測点では、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。発生した地震動の性質を分析したところ、 K-NET正院では建物の大きな被害と相関がある周期1-1.5秒の応答が大きく、これが全壊した木造建物が見られた要因と考えられる。その他の強震記録は、震度と相関がある周期1秒以下の短周期が卓越している一方、周期1-1.5秒の成分は小さく、そのため、これらの観測点周辺で大きな被害を受けた建物が見られなかったと考えられる。

#### 1. はじめに

2023年5月5日に発生した能登半島沖を震源とする 地震(M<sub>j</sub>6.5)では、最大震度6強の強い揺れが観測さ れた。本稿では、筆者らが行った強震観測点周辺の 建物被害調査と、発生した地震動の性質との対応性 について検証した結果を報告する。

#### 2. 調査の概要

調査の対象とした強震観測点は、震度5強以上を記録した図1に示す6点とした。なお、K-NET大谷 (兼珠洲市大谷町震度計)の震度は、気象庁発表では5強であるが、防災科学技術研究所と筆者らの計算では震度6弱となっており、本稿では、計算方法を揃えるため、筆者らが算出した結果を用いることとする。調査は、2023年5月13~14日に行った。調査範囲は、観測点から半径200m以内とした。半径200m以内としたのは、強震観測点で観測された地震動とできる限り同一の揺れとみなせるように観測点近傍に範囲を限定すること、建物被害率を算出するために充分な数の建物が存在することの相反する2つの条件を考慮した結果である(例えば汐満ら、2024))。範囲内のすべての建物について、外観から被害レベル、構造種別(木造、非木造)を判定し

た。被害率算出のための被害レベルは、全壊(岡田 ら、1999)、大破(日本建築学会、1980)という大 きな被害のみとした。なお、寺社、倉庫、蔵等や地 盤被害、基礎の被害を受けた建物は対象外とし、建 物棟数と被害棟数にはカウントせず、後述する建物 分布図にも記載していない。つまり、調査範囲内の 寺社や倉庫等を除く全ての建物の振動による上部構

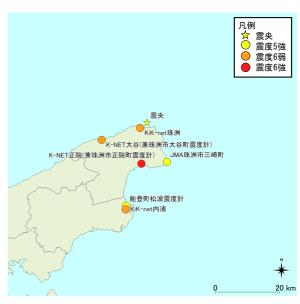


図1調査した観測点の位置

造の被害を対象とした。

#### 3. 被害調査結果

#### 3.1 観測点周辺の被害状況

## (1) K-NET大谷(兼珠洲市大谷町震度計)

観測点は、珠洲市大谷小中学校の敷地内に設置されており(写真1)、範囲の北側には海がある(写真2)。 観測点周辺の建物分布図を図2に示す。周辺(写真3~5)には30棟の建物があり(うち木造建物28棟)、 瓦屋根に被害を受けた木造建物(写真6)が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は

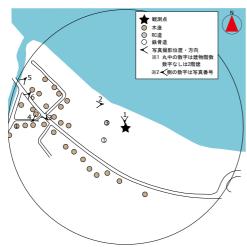


図2K-NET 大谷周辺の建物分布



写真 1 K-NET 大谷



写真2調査範囲北側の海



写真 4 周辺の様子

写真3 周辺の様子



写真 5 周辺の様子



写真6 瓦屋根の被害

見られなかった。

## (2) K-NET正院(兼珠洲市正院町震度計)

観測点は、珠洲市正院町正院の一角に設置されている(写真7)。観測点周辺の建物分布図を図3に示す。周辺(写真8~9)には42棟(うち木造建物38棟)の建物があり、全壊した木造建物が4棟見られ(写真10~12)、全壊・大破率は9.5%、全壊率は10.5%となった。

## (3) KiK-net内浦

観測点は, 能登町立松波中学校付近の林の中に設

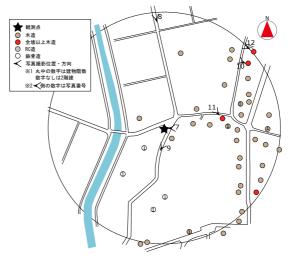


図3 K-NET 正院周辺の建物分布



写真 7 K-NET 正院



写真 8 周辺の様子



写真 9 周辺の様子



写真 10 全壊した木造建物



写真 11 全壊した木造建物 写真 12 全壊した木造建物

置されている(写真13)。観測点周辺の建物分布図を図4に示す。周辺(写真14~15)の建物は2棟(うち木造建物1棟)と少なく、瓦屋根に被害を受けた木造建物が見られたが(写真16)、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。

#### (4) KiK-net珠洲

観測点は、珠洲市折戸町の一角に設置されており (写真17)、範囲の北側には海がある(写真18)。観 測点周辺の建物分布図を図5に示す。周辺(写真19~ 21)には12棟の建物(うち木造建物10棟)があり、瓦 屋根に被害を受けた木造建物(写真22)が見られた が、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は 見られなかった。

## (5) 能登町松波震度計

観測点は、能登町内浦総合支所(写真23)の建物内

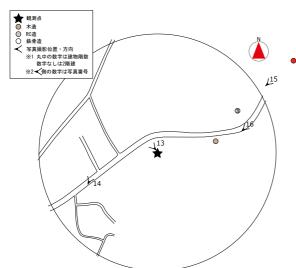


図 4 KiK-net 内浦周辺の建物分布



写真 13 KiK-net 内浦



写真 14 周辺の様子



写真 16 瓦屋根の被害

に設置されている。しかし、調査当日は支所が空いておらず、設置位置を確認できなかったため、調査は範囲を広く取った上で行い、設置位置は、後日支所の方に教えていただいた。観測点周辺の建物分布図を図6に示す。周辺(写真24~26)には101棟の建物(うち木造建物96棟)があり、瓦屋根に被害を受けた木造建物(写真27~28)が見られたが、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。

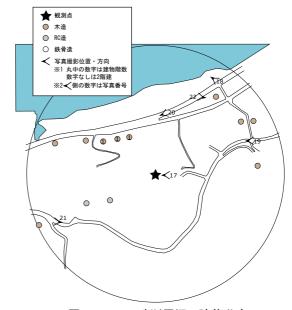


図 5 KiK-net 珠洲周辺の建物分布



0

写真 17 KiK-net 珠洲



写真 19 周辺の様子



写真 20 周辺の様子



写真 21 周辺の様子



写真 22 瓦屋根の被害



写真 15 周辺の様子

(能登町立松波中学校)

## (6) JMA珠洲市三崎町

観測点は、金沢大学能登学舎の敷地内に設置されて いる(写真29)。調査範囲の東側には海がある(写真 30)。周辺(写真31~32)には26棟(うち木造建物25 棟)の建物があり、軽微なものも含めて、建物被害は 見られなかった。

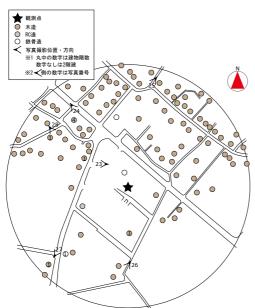


図 6 能登町松波震度計周辺の建物分布



写真 23 能登町内浦 総合支所



写真 24 周辺の様子



写真 25 周辺の様子



写真 26 周辺の様子



写真 27 瓦屋根の被害



写真 28 瓦屋根の被害

## 3.2 調査結果のまとめ

表1に建物棟数や被害率といった調査結果を記す。 K-NET正院では4棟の木造建物が全壊し、全壊率は 10.5%となったが、その他の観測点周辺では、瓦屋根 の被害といった軽微な被害は見られたものの,全壊・ 大破といった大きな被害を受けた建物は見られなか った。

# 4. 発生した地震動の性質と被害調査結果の 対応

表1に、調査を行った観測点の地震動強さを記して いる。地震動強さ指標には、建物の大きな被害と相 関が高い周期1-2秒、1-1.5秒のスペクトル値から算

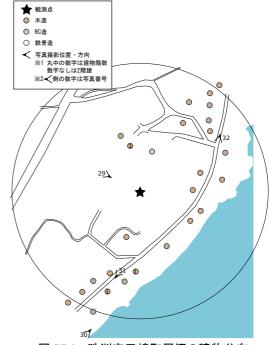


図 7JMA 珠洲市三崎町周辺の建物分布



写真 29 JMA 珠洲市三崎町 写真 30 範囲東側の海





写真 31 周辺の様子



写真32 周辺の様子

表1被害調査結果と地震動強さ

			建物	棟数	全壊·	大破棟数	全壊・	木造		地	震動強さ		-
地震名	観測点名	震度	全体	木造	全体	木造	大破率 [%]	全壊率 [%]	PGA <sup>**1</sup> [cm/s <sup>2</sup> ]	PGV <sup>*2</sup> [cm/s]	計測震度	1-2秒 震度	1-1.5秒 震度
	K-NET大谷	6弱	30	28	0	0	(0.0)	(0.0)	530.9	42.3	5.5	5.09	5.15
2023年	K-NET正院	6強	42	38	4	4	(9.5)	(10.5)	650.8	100.7	6.1	6.10	6.10
石川県能登半島沖	KiK-net内浦	6弱	2	1	0	0	(0.0)	(0.0)	539.3	25.4	5.5	4.57	4.62
の地震	KiK-net珠洲	6弱	12	10	0	0	(0.0)	(0.0)	606.5	59.4	5.9	5.33	5.32
V ノルビル交	能登町松波震度計	5強	101	96	0	0	0.0	0.0	239.5	28.0	5.1	4.65	4.70
	JMA珠洲市三崎町	5強	26	25	0	0	(0.0)	(0.0)	377.9	26.4	5.0	4.72	4.65
	1995年兵庫県南部地震 JR鷹取	6強	545	207	190	123	20.5	43.1	741.6	157.2	6.4	6.64	6.65
過去の記録	2004年新潟県中越地震 JMA小千谷	6強	164	114	2	2	1.2	1.8	975.0	93.6	6.3	5.93	5.97
	2011年東北地方太平洋沖地震 K-NET築館	7	58	51	0	0	0.0	0.0	2765.2	105.8	6.6	5.39	5.37

<sup>※1</sup> 地動最大加速度 (水平2方向ベクトル合成)

出される震度として1-2秒震度, 1-1.5秒震度 (境 ら, 2023) も記している。PGAはK-NET正院, KiK-net珠洲で600cm/s<sup>2</sup>を超えており, PGVはK-NET正院で100cm/sを超えている。

図8に加速度応答スペクトルを、一般的な減衰定数 5%のものと、建物の全壊時の等価減衰に相当する 20% (境, 2013) のものを示す。図9には過去の強 震記録,具体的には,1995年兵庫県南部地震のJR鷹 取,2004年新潟県中越地震のIMA小千谷,2011年東 北地方太平洋沖地震のK-NET築館と、今回の地震で 計測震度および1-1.5秒震度が最も大きかったK-NET 正院の記録を合わせて示している。図8および表1よ り、今回の地震におけるK-NET正院以外の記録は、 震度と相関がある周期1秒以下の短周期(境ら, 2002) が卓越している一方, 建物の大きな被害と相 関がある周期1-1.5秒の成分は、木造全壊率0%であ った2011年東北地方太平洋沖地震のK-NET築館と同 程度かそれ以下である。そのため、これらの観測点 周辺で全壊・大破といった大きな被害を受けた建物 が見られなかったのは、震度と相関がある周期1秒 以下の短周期が卓越した一方, 建物の大きな被害と 相関がある周期1-1.5秒の成分は小さかったためであ ると考えられる。しかし、K-NET正院の周期1-1.5秒 の成分の大きさは、木造全壊率1.8%であった2004年 新潟県中越地震JMA小千谷よりも大きく, 1-1.5秒震 度は6強に達している。K-NET正院周辺の木造全壊 率は10.5%と大きく、4棟の木造建物が全壊してい る。そのため、K-NET正院周辺で全壊という大きな 被害を受けた建物が見られたのは、建物の大きな被 害と相関がある周期1-1.5秒の成分が大きかったこと が原因として考えられる。

#### 5. まとめ

2023年5月5日に発生した能登半島沖の地震において、震度5強以上を記録した強震観測点周辺の建物被害調査を行った。その結果、K-NET正院で4棟の木造

建物が全壊しており、木造全壊率は10.5%に達したが、その他の観測点周辺では、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物は見られなかった。発生した地震動の性質と建物被害の関係について検証したところ、多くの強震記録は震度と相関がある周期1秒以下の成分が卓越している一方、建物の大きな被害と相関がある周期1-1.5秒の成分は小さかった。そのため、震度が大きいにも関わらず、大きな被害を受けた建物が見られなかったと考えられる。しかし、K-NET正院は周期1-1.5秒の成分が大きく、その大きさは木造全壊率が1.8%であった2004年新潟県中越地震JMA小千谷を超えており、このことが、K-NET正院周辺で木造全壊率10.5%もの被害が生じていた要因であると考えられる。

#### 謝辞

現地の方々には、被災されているにも関わらず 様々なご協力をいただきました。被害調査は、京都 大学大学院工学研究科長谷川千紘氏、宇都宮大学地 域デザイン科学部稲見圭人氏と共同で行いました。 調査を行うにあたり、自然災害研究協議会の支援を 受けました。強震記録は石川県、防災科学技術研究 所、気象庁、鉄道総合技術研究所より提供していた だきました。地図の作成に国土地理院地球地図日本 のデータを利用しました。

#### 参考文献

汐満将史・中澤駿佑・境有紀・松井貴宏・村嶋美波・ 江口直希(2024):2021年福島県沖の地震における 強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応 性,日本地震工学会論文集,Vol.24, No.1, pp.1\_148-1\_177

岡田成幸・高井伸雄 (1999): 地震被害調査のための 建物分類と破壊パターン,日本建築学会構造系論文 集, No. 524, pp. 65-72

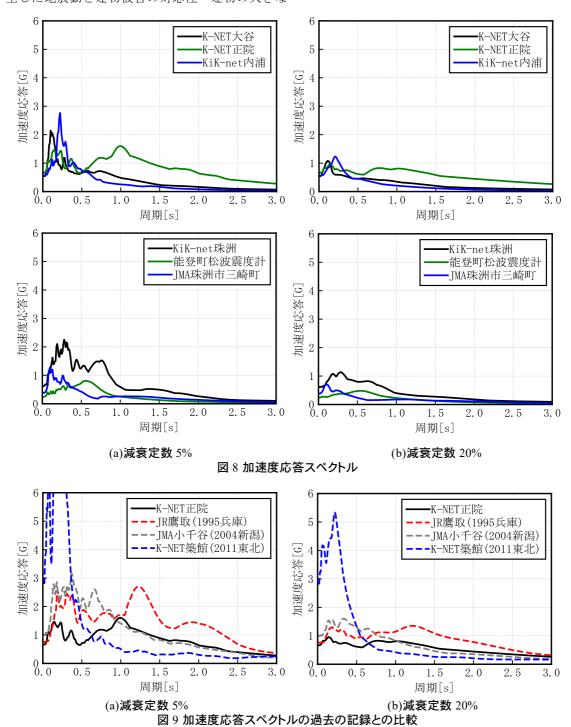
<sup>※2</sup> 地動最大速度(加速度波形に0.1-10Hzのバンドパスフィルタをかけて積分し、水平2方向ベクトル合成したものの最大値)

日本建築学会(1980):1978年宮城県沖地震災害調査報告,日本建築学会,908p

境有紀・中澤駿佑・亀井健司 (2023): 建物被害から 見た関東平野で発生する地震動の性質,第51回地盤 震動シンポジウム,pp.60-68.

境有紀(2013):2011 年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性-建物の大きな

被害をより正確に推定する地震動強さ指標-,日本 建築学会構造系論文集,第78巻,第683号,pp.35-40. 境有紀・神野達夫・纐纈一起(2002):建物被害と 人体感覚を考慮した震度算定方法の提案、第11回 日本地震工学シンポジウム論文集、pp.17-22



# リビアのDerna(EI-Bilad) and Abu Mansour ダム決壊洪水に関する 災害後緊急調査

角 哲也\*·Sameh Kantoush\*, Hammouda Boutaghane\*\*, Jalel Aouissi\*\*\*, Abdelwanis Achour\*\*\*\*, Jalal Al Quarioti\*\*\*\*\*

\* 京都大学防災研究所 \*\* Annaba University, Algeria \*\*\* INAT, Tunisia \*\*\*\* Omar Al Mokhtar University, Libya \*\*\*\*\* Expert, Jordan

## 要旨

近年、中東・北アフリカ地域の乾燥・半乾燥地域のワジ(涸れ)川流域において、フラッシュフラッドが頻発しており、地球温暖化の影響とも指摘される。2023年9月に地中海で発生したメディケーン・ダニエルがリビアの北東海岸に位置するワジ・デルナ(Derna)に豪雨をもたらし、流域に設置されていた2つのダムが決壊した。その結果、大規模な洪水が下流のデルナ市街地を襲い、壊滅的な被害を発生させた。ダムの決壊原因は、構造的な欠陥および洪水吐の放流能力を超える洪水の発生の複合的な原因が想定されている。京都大学防災研究所では、現地の研究者と連携してダム決壊の原因と下流被害を明らかにするための現地調査を実施した。その結果、ダムの越流決壊の状況を明らかにするとともに、下流への洪水や土砂の氾濫堆積状況に関する詳細なデータを取得することができた。

#### 1. はじめに

近年、中東・北アフリカ地域の乾燥・半乾燥地域のワジ(涸れ)川流域において、フラッシュフラッドが頻発しており、地球温暖化の影響とも指摘される。ここで、ワジの洪水の特徴は、1)平常時は全く水が流れていないが、総降雨量10~15mm程度でもほとんど地下に浸透せずに表面流出となり、急激に洪水流が押し寄せてくる、2)河床には砂を中心に、角礫を含む砂礫が厚く堆積し、洪水時には短時間の急激な土砂移動が発生していることが想像される、3)表流水はないが、砂礫層の下に地下水が流れ、これを取水して生活するために、ワジ近傍に農地や住居が所在している、4)人口増加により居住地域の拡大が求められワジの下流地域が開発されることで洪水リスクが増大している、ことにある。

京都大学防災研究所では、このようなフラッシュ フラッド洪水の発生メカニズムの解明や対策手法の 開発について、エジプト、オマーン、ヨルダン、モロッコ、アルジェリア、UAE、スーダンなどとともに研究ネットワークを形成して交流を進めてきた(中東・北アフリカにおけるワジ・フラッシュフラッドの統合リスク管理に関する拠点形成(JSPS-研究拠点形成事業-B.アジア・アフリカ学術基盤形成型(Core to Core))(Sumi et al. 2022)。

こうした中で、2023年9月に地中海で発生したメディケーン・ダニエルが北アフリカのリビアの北東海岸に位置するワジ・デルナに豪雨をもたらし、流域に設置されていた2つのダム(Derna(El-Bilad) and Abu Mansour dams)が決壊した(2023.9.11)。その結果、大規模な洪水が下流のデルナ市街地を襲い、壊滅的な被害を発生させた。ダムの決壊理由としては、今回の洪水がダムの洪水吐の放流能力をはるかに超えたためにダムの越流が発生したことや、リビアの政治的な混乱もあって構造的な欠陥が放置されていたことが指摘されている。

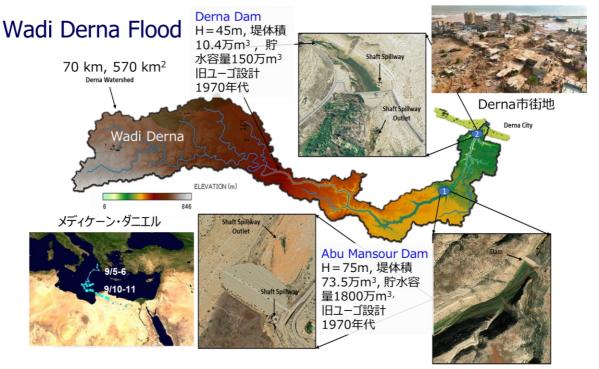


図1 デルナ流域と2つのダム (Abu Mansour (上流)、Derna (下流) dam)

京都大学防災研究所では、このダムの決壊洪水に関して、現地の研究者と連携してダム決壊の原因と下流被害状況を明らかにするための現地調査を実施した(2023.11.12-16)。ここでは、今回の洪水の概要を整理するとともに、ダムの越流決壊の状況や下流への洪水や土砂の氾濫堆積状況に関して現地調査で明らかとなったことを紹介する。

## 2. ワジ・デルナで発生した洪水の概要

リビアのデルナで最近発生した壊滅的な洪水は、 地中海に発生した「メディケーン」と呼ばれる低気 圧で、発達して地中海沿岸に強風や大雨をもたらし た。ここでは、その洪水被害の概要を示す。

# 2.1 ワジ・デルナの流域特性

デルナ流域は、リビアの北東海岸に位置し、東西約75kmの流程、約557km²の面積を占めている(図1)。この流域は、Jabel Al Akhdarとして知られる広大な高原の一部であり、3つの区間に分けられる。(1)上流:集水域の約345 km²を占めるこの地域は、年間降雨量が多く、平均約400 mmである。(2)中流: Al-Washka山脈とAbu Mansour ダムの間に位置し、約140 km²の面積を占め、年間平均降雨量は約150 mmである。(3)下流: Abu Mansourダムから地中海まで広がるこの区間は、年間平均降雨量が約250 mmであり、洪水の主な収束点としてDerna(EL Bilad)ダムに集まり、最終的にデルナ市街地に流れ下る。

#### 2.2 メディケーン・ダニエルと異常豪雨

メディケーンは、中心に暖かい空気があり、台風の目に類似している。秋から冬にかけて地中海の西部で最も多く発生し、半径は200キロ程度と小型であり、気象衛星が普及した1980年代ごろから多く観測されるようになった。9月4日に地中海のギリシャ上空で発生したダニエルは、9/5-6の24時間に750mmの降雨をもたらした。一般にメディケーンがリビアに近づくケースは少ないが、今回は地中海の海水温が高く、ダニエルが発達して勢力を増しながらリビアに上陸し、この地域に異常な豪雨をもたらした。

この地域の年間降雨量は200~400mm (1960-2000) であるのに対して、もたらされた降雨量 (9/10-9/11) は150~240mm/24hr (Al-Bayda: 414mm/24hr)であり、一部の地域ではわずか 24時間の間に18か月分に匹敵する降雨量が記録された。参考までに、9/11午後のGSMaP (JAXA) の降雨観測状況を図2に示す。これまでの分析では33 mm/24hrが1/150確率、400 mm/24hrは1/1500確率と推定されている。



図2 9/11のGSMaPの降雨観測状況 (JAXA)

#### 2.3 下流の被害状況

ワジ・デルナに建設された2つのダムは、洪水防御に加えて、地下水の涵養と農地への灌漑用水を供給する目的として設計された。ダムの貯水容量(1985年時点)は、それぞれ上流のAbu Mansourダム (2,370万m³) と下流のDerna (EL Bilad) ダム (115万m³) であり、これを単純に上流と中流の流域面積485km²で割れば、51mmの降雨量に相当する。今回の豪雨によってもたらされた洪水量は、ダムの容量を大きく超過して満水にするとともに、これを越流して下流に押し寄せた結果、下流のデルナ市街地が広範囲に浸水した。その破壊力は甚大であり、河道に架かる5橋が落橋し、港湾も大きく損傷した。

デルナ市街の氾濫面積は6km²に及び、破壊された 家屋が891棟、氾濫に伴う土砂堆積が398棟に上って いる。人的被害は、死者が5000人以上、行方不明者が 1万人以上、負傷者が4万人とも数えられている。

## 3. ワジ・デルナのダム建設と決壊原因

1970 年代に、旧ユーゴスラビアの企業によって、デルナ流域内にAbu MansourダムとDerna (EL Bilad) ダムが建設された。ここでは、これまでの洪水履歴、ダムの決壊原因の推定を整理する。

#### 3.1 過去の洪水事例とダムによる洪水対策

デルナ市街地は、比較的標高が低く平均標高は海抜約10mである。この土地は、もともとワジ・デルナの氾濫原であり、度重なる洪水と土砂の堆積によって形成された洪水に対して脆弱な地理的条件を有している。デルナ流域では、以下のように度重なる突発的な洪水が発生したことが記録されている。

- ・第二次世界大戦中の1941年に、ワジ・デルナとワジ・アルナカに流れ込んだ大洪水によってドイツ軍の戦車が流されたことが記録されている。ただし、戦時下のために被害記録は限定的である。
- ・1956年にも大洪水が発生したが、デルナ市街には 大きな被害はなかった。
- ・1959年の大洪水により人的および物的損失が発生し、洪水により橋の1つが一時的に閉鎖された。
- ・1968年10月に大雨により大洪水が発生したが、大きな被害はなかった。
- ・1986年の洪水は、2つのダム建設後に発生した。下流のDernaダムは漏水による軽微な被害を受けたが、上流のAbu Mansourダムは洪水を効果的に貯留し、さらなる被害の増大を防止した。
- ・最近の洪水は2011年11月3日に発生し、洪水がダム の洪水吐から放流された。洪水の強さは中程度で あり、市内の道路が冠水した。

#### 3.2 ダムの決壊原因の推定

デルナのダム決壊の具体的な原因は、入手可能な データが限られているため不明の点が多い。しかし、 これまでの検討で、構造上の弱点や前例のない洪水 量など、いくつかの要因がこれらの決壊に寄与して いることが示唆されている。

#### (1) 構造上の弱点

ダムには、洪水を制御する底部放流ゲートは設置されていない。2つのダムともに、余水吐きとしてはシャフト式(朝顔形)の洪水吐が設置され、それぞれ、上流のAbu Mansourダムが、直径3.5mのトンネルで放流能力が170 m³/s、下流のDernaダムが、直径6mで放流能力が350m³/sであった。これらのシャフト式の洪水吐は、フラッシュフラッドがもたらす急激な水位上昇と流量増加を安全に処理するには不十分であると考えられた。

それ以外にも、Abu Mansourダムでは、ダム堤体からの漏水が発生していたほか、Dernaダムでは、ダム堤体の右岸側でダム天端の沈下 (15 cm) が確認されており(2006)、その改修提案がなされていた。しかしながら、リビアの国内政治事情により適切な対策が取られていなかったことも、今回のダム決壊の要因の一つとして挙げられている。

## (2) 異常洪水の発生

1970年代にダムが建設された際に想定されたダムの洪水吐の能力を求める設計洪水流量は、1/1000年確率流量で、上流Abu Mansourダムで、ピーク流入量が840m³/s、洪水流入水量1400万m³であり、ダムの貯水容量が洪水流入水量を上回るために、その貯留効果を考慮して、洪水吐の放流能力として170m³/sが提案されていた。同様に、下流Dernaダムでは、ピーク流入量が350m³/s、洪水流入水量400万m³であり、この場合は、貯水容量が洪水流入水量を下回ることから、洪水吐の放流能力としてピーク流入量と同等の350m³/sが提案されていた。

これに対して、今回の洪水で推定されている洪水ピーク流入量は上流Abu Mansourダム地点で約2,000m³/s以上、洪水流入水量8,000万m³以上と推定され、上記のダムの貯水容量や洪水吐の放流能力を大きく上回っている。

なお、今回のワジ・デルナの洪水では、雨域が西から東に移動したことが衛星データからも明らかである。一般に、河川にとって洪水量が大きくなるのは、主流に沿って上流から下流に向かって雨域が移動する場合であり、今回の降雨がそれに該当する厳しい降雨パターンであったことが推定される。

#### 4. 現地調査

京都大学防災研究所は、ダム決壊や下流の被害状況を明らかにするために、リビアのオマール・アル・ムクタール大学と連携して災害後の現地調査を実施した。日本からは現地に直接渡航することが困難だったため、現地調査は、当事国のリビアの研究者に加えて、これまで培ってきたフラッシュフラッドの研究ネットワークを活用して、近隣国のアルジェリア、チュニジアやヨルダンからの専門家の応援を得て2023年11月11日から16日まで実施された。

現地調査は、主に、貯水池および河道の洪水痕跡や土砂の堆積状況とサンプリング、デルナ市街地域の洪水痕跡や土砂の堆積状況とサンプリングなどを目的に実施された。

#### (1) Abu Mansour ダムの状況

上流に位置するAbu Mansourダムの構造図と決壊前の写真を図3に示す。ダムは堤高75m(河床から45m)のロックフィルダムであり、シャフト式(朝顔形)の非常用洪水吐が設置されている。決壊後のダムの状況を写真1~3および図4(ドローン空撮データより生成)に示す。円筒状の取水塔の上部に洪水痕跡が残されており、ダムの天端を超える洪水が流下したことが明確である。また、写真2や図4で示すように、堤体直下流に深掘れ穴が形成されており、ダムを越流した際の落下水により洗掘されたものと推定される。

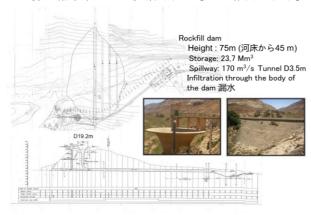


図3 Abu Mansourダムの構造図と決壊前の写真



写真1 Abu Mansourダム (決壊後) から上流を望む



写真2 Abu Mansourダム(決壊後)と河床状況



写真3 Abu Mansourダム (決壊後) の越流状況

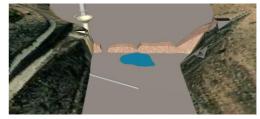


図4 Abu Mansourダム (決壊後) 付近の模式図

## (3) Derna ダムの状況

下流に位置するDerna (EL Bilad) ダムの構造図と 決壊前の写真を図5に示す。ダムは堤高40m (河床から25m) のロックフィルダムであり、同様にシャフト 式 (朝顔形) の非常用洪水吐が設置されている。

決壊後のダムの状況を写真4および図6に示す。洪水痕跡からはダムを約6m越流したものと推定されている。なお、上流ダムと異なり、円筒状の取水塔が完全に倒壊していることがわかる。これは、上流ダムの決壊に伴う洪水の段波が下流ダムに流下して取水塔を押し倒したことが考えられる。

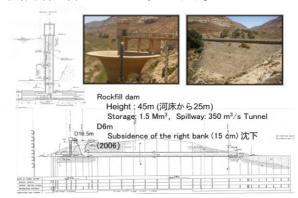


図5 Dernaダムの構造図と決壊前の写真



写真4 Dernaダム (決壊後) と河床状況



図6 Dernaダム (決壊後) 付近の模式図

## (4) デルナ市街の状況

デルナの人口は約10万人(2011年)であり、写真5に示すように、中心部をワジ・デルナが流れるワジと共存する町であった。これが、写真6のように洪水の影響で大きく浸水被害を受け、ワジの近くに残されたモスクで3.85mの浸水深であったことが調査により明らかになった。また、写真7に示すように、家屋の2階に達する被害が確認されるとともに、道路部には洪水によってもたらされた大量の土砂が堆積している状況である。

これらの土砂の起源は明確ではないが、洪水によって上流のワジの河床や河岸が侵食されたものと、2つのダム(特に、上流のAbu Mansourダム)の貯水池内に堆積していた土砂が決壊とともに流出したものが合算されている可能性が考えられる。

デルナ市街地の浸水深を調査したポイントごとに 図示したものを図7に示す。これによれば、ワジの河 道近くで高いところで約12m、河道から数百m離れた 場所で約3m程度の浸水深があったことがわかる。



写真5 デルナ市街地の洪水前の状況 (UNESCO提供)



写真6 デルナ市街地の洪水前後の比較



写真7 デルナ市街地の洪水被災状況(土砂堆積)

#### 5. まとめと今後の課題

これまでに得られた情報をとりまとめるとともに、 今後の課題について整理する。

## 5.1 ダム決壊に関して得られた情報の整理

- ・ダム決壊の主な原因は、ダム天端を越水する規模の洪水が流入したことに伴う越流決壊であり、両方のダムの目撃者によれば、下流のダムが先に決壊し、1時間後に上流ダムが決壊したとされている((下流)2023年9月11日午前1時30分,(上流)午前2時30分)。
- ・デルナ流域で記録された豪雨強度は最大400mmであり、2003年のスイス企業Stucky社の研究と2008年以降の研究でも指摘されていたように、建設当時の降雨データが不十分だったため、設計洪水流量の推定が不正確であった。
- ・過去の洪水、特に、1986年の洪水時にダム堤体に亀 裂が発生していた。ダムの定期的なメンテナンス と、建設から崩壊時までのフィルダムの浸潤線に 沿った水の浸透の監視が欠如していた。
- ・また、ダム貯水池に堆積した土砂は、ダム構造にさらなる負荷を与え、ダムの高さと貯水容量を低下させていたが、十分な対策がなされていなかった。



図7 ワジ・デルナとデルナ市街地の浸水深分布

- ・シャフト式 (朝顔形) 洪水吐の直径 (放流能力) が 小さいため、洪水の放流に適切に対処できず、ダ ムが越流してしまった可能性が高い
- ・両方のダムの高さを下げながら洪水吐を追加し、 ダムが越流するのを防ぐという勧告が2003年以来 行われていたが、これが履行されていなかった
- ・ワジ・デルナの上流域にさらに別のダムを建設し、 Abu Mansourダムへの洪水外力を軽減する勧告が 2003年以来行われていたが、未実施であった

## 5.2 今後の課題

- ・ワジ・デルナを含めたワジのフラッシュフラッド の降雨量および洪水量の頻度分析
- ・メディケーン・ダニエルのような低気圧の発生予 測と早期警戒体制の確立
- ・デルナ市の都市化の進行が、洪水リスクを増大さ せた要因
- ・ダムの決壊分析とモデル化
- ・フラッシュフラッドの流下モデルの高度化
- ・ダムの堆積土砂の起源と伝播
- ・洪水リスクを軽減するための改善方策(上流域に おける流出抑制・洪水貯留戦略、ダム構造物の強 靭化、氾濫原における洪水リスクの低減方策など)

#### 6. おわりに

これまで、乾燥・半乾燥地域のフラッシュフラッドに関する研究を進めてきたが、今回のデルナの洪水は、降雨量、雨域規模のどちらを取っても大きく想定を上回るものと考えられる。今後、気候変動によって今回のような大規模な降雨イベントが増大す

ることを想定すれば、これら地域の洪水対策を大幅 に見直す必要があるものと考えられる。

一方、気候変動により渇水はより厳しくなることが想定されており、貴重な水資源である洪水を効果的に貯留して、地下水に涵養するなどの対策が一層求められる状況にある。このため、ダム施設の安全性を向上させるための、洪水予測モデルの高度化と洪水吐の機能強化、ダムの洪水量の不確実性に対して強靭な構造設計(越流に強い台形CSG(Cemented Sand Gravel)ダムの導入など)などのソフト・ハードの両面からの日本の貢献が求められる。

なお、第8回ワジのフラッシュフラッドに関する 国際会議 (ISFF) をUAEで開催し、リビアのダム決壊 洪水を含めた最新の情報交換を予定している。

https://conferences.uaeu.ac.ae/isff8/en/index.shtml

#### 謝辞

本調査の実施にあたり自然災害研究協議会の災害調査支援を受けた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

Tetsuya Sumi, Sameh A. Kantoush, Mohamed Saber, editors(2022): Wadi Flash Floods, Challenges and Advanced Approaches for Disaster Risk Reduction, Springer.

International Bank for Reconstruction and Development /
The World Bank (2024): Breaking Point, An Assessment
of the Potential Failure Modes of the Wadi Derna Dams
(in Press)

# 2024年能登半島地震の建物被害調査と発生した地震動の破壊力の検証

中澤 駿佑\*・汐満 将史\*\*・境 有紀\*\*\*

\* 宇都宮大学

\*\* 山形大学

\*\*\* 京都大学防災研究所

## 要旨

2024年能登半島地震において強震観測点周辺の被害調査を行い、調査結果と地震動の破壊力の対応について検証した.建物の大きな被害と相関の高い周期1-2秒の応答が大きい珠洲、輪島、穴水の観測点では周辺の建物に甚大な被害が生じた.震度7にも関わらず大きな被害を受けた建物がなかったK-NET富来の地震動は、計測震度と相関のある周期1秒以下の短周期の応答が卓越する一方で周期1-2秒応答は小さく、このことが建物の大きな被害が生じなかった原因と考えられる。非線形地震応答解析の結果、全壊した建物の見られた観測点の地震動は耐震性の低い建物に対する破壊力が大きく、観測点周辺に古い建物が多かったことが甚大な被害の一因と考えられる。

#### 1. はじめに

2024年能登半島地震では、最大震度7の強い揺れが 観測された。筆者らは、震度6弱以上を観測した強震 観測点を対象として、観測点周辺の被害調査を行っ た。本稿では、観測点ごとの調査結果を示し、発生し た地震動の性質と建物被害の関係について検討を行 う。

#### 2. 調査の概要

図1に、調査を行った観測点を示す。図中のJMAは 気象庁震度観測点、震度計は地方公共団体震度計を 示している。調査を行う観測点は、

- 1. 震度7を観測した全ての観測点
- 2. 震度6弱以上は、調査計画時点で強震記録が公 開されているか、周辺に80棟以上の建物が存在 する観測点

という条件で図1の12観測点とした。周辺の建物棟数は観測点の正確な位置を特定する前に衛星写真を用いて数えたもののため、調査の結果が80棟未満となる場合がある。

調査範囲は、観測点から半径200m以内とし、範囲

内の全ての建物について,外観から構造種別と全壊・大破といった被害の有無を判定し,被害率を算出した。なお,寺社や倉庫,地盤や基礎の被害を受けた建物は対象外とし,被害率を算出するための全建物棟数と被害棟数にはカウントしていない。つまり,調査範囲内の寺社や倉庫等を除く全ての建物の,振動による上部構造の被害を対象とした。定量的な被害データは建物のみを対象としたが,地盤等の建物以

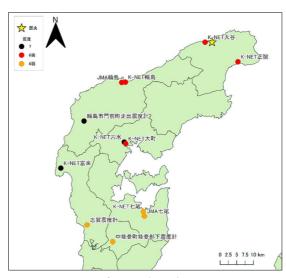


図1 対象とした観測点の位置

外の被害についても記録を行った。

## 3. 調査結果

本節では、各観測点周辺の被災状況について述べる。ただし、全ての観測点を掲載することは紙面の都合上難しいため、一部の観測点についてのみ報告する。以下には各観測点周辺(観測点から半径200m円内)の建物分布図を示しているが、図中の「<」は写真を撮った向き、番号は写真番号を表している。各建物はその中心位置に〇印で表していて、建物の一部が観測点から半径200m円内にあれば範囲内としているため、〇印の位置が半径200m円内の若干外側になることもある。〇印の中の数字は建物階数で、数字なしは2階建てを意味している。

## 3.1 各観測点周辺の被災状況

### (1) K-NET富来(震度7,調査日:1/7)

観測点は志賀町香能にある農場付近の道路沿いに 設置されている(写真1,2)。周辺には5棟の建物(全

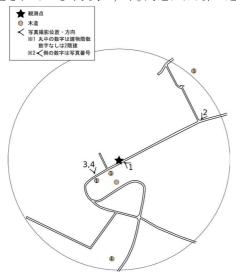


図2K-NET 富来周辺の建物分布



写真 1 K-NET 富来



写真 2 周辺の様子



写真3 瓦屋根の被害 写真4 窓ガラスの被害

て木造)があるが、全壊・大破といった大きな被害を 受けた建物は見られなかった。軽微な被害では、瓦 屋根の被害(写真3)や、ガラス窓の被害(写真4) が見られた。

### (2) K-NET穴水(震度7,調査日:1/8)

観測点は、のと鉄道穴水駅から北に300mほどにある公園の敷地内に設置されている(写真5)。周辺には137棟の建物(うち木造建物129棟)があり、木造建物24棟が全壊していた(写真6~8)。建物の軽微な被害ではガラス窓に被害を受けた建物が見られた。建物以外の被害では、地盤の被害や倒壊した塀が見られた。

## (3)輪島市門前町走出震度計(震度 7,調査日: 1/27)

観測点は輪島市役所門前総合支所の庁舎(写真9) の建物内に設置されている(写真10)。庁舎の敷地内

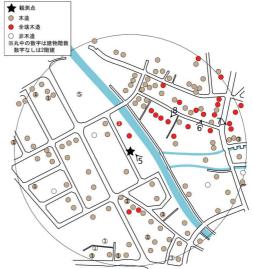


図 3 K-NET 穴水周辺の建物分布



写真 5 K-NET 穴水



写真 6 全壊木造



写真 7 全壊木造



写真8全壊木造

には地盤の被害が多数見られた(写真11)ことから, 観測記録には建物の応答や地盤の被害の影響が含まれ,周辺で生じた地震動と異なる可能性がある。周辺には76棟の建物(うち木造建物63棟)があり,木造建物14棟が全壊(写真12)していたほか,鉄骨造建物1棟が大破していた。建物以外の被害では,地盤の被害や倒壊した塀が見られた。

## (4) JMA輪島(震度6強, 調査日:1/9)

観測点は輪島地方合同庁舎(写真13)の南側に設置されている(写真14)。周辺には222棟の建物(うち木造建物207棟)があり、木造建物54棟が全壊していた(写真15,16)。建物の軽微な被害ではガラス窓に被害を受けた建物が見られた。建物以外の被害では、地盤の被害や倒壊した塀が見られたほか、電柱の倒壊による道路閉塞も見られた。

#### (5) K-NET輪島(震度6強,調査日:1/9)

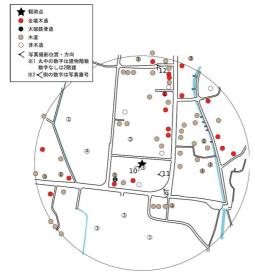


図 4 輪島市門前町走出震度計 周辺の建物分布



写真 9 輪島市役所 門前総合支所



写真 10 輪島市門前 走出震度計



写真 11 地盤被害



写真 12 全壊木造

観測点は一本松公園の北西の端にある坂の途中に設置されている(写真17)。周辺には180棟の建物(うち木造建物171棟)があり、木造建物62棟が全壊していた(写真18~20)。建物の軽微な被害では外装に被害を受けた建物が見られた。建物以外の被害では、地盤の被害や倒壊した塀が見られた。

## (6) K-NET正院(震度6強,調査日:1/26)

観測点は正院町正院の道路沿いに設置されており (写真21),観測点の北側には1.3mほどの段差がある(写真22)。周辺には38棟の建物(うち木造建物34棟)があり、木造建物15棟が全壊していた(写真23,24)。ただし、本観測点では2023年5月に発生した能登半島沖の地震の際に、周辺の木造建物の10.5%が全壊しており、これらの建物は建物棟数、全壊木造棟数には含んでいない。建物の軽微な被害では瓦屋根に被害を受けた建物が見られた。建物以外の被害では、地盤の被害や倒壊した塀が見られた。

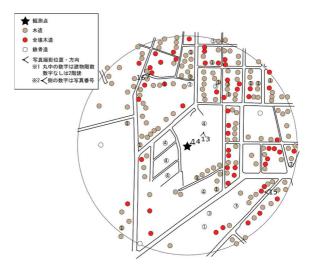


図 5 JMA 輪島周辺の建物分布



写真13 輪島地方合同庁舎 写真 14 JMA 輪島



写真 15 全壊木造



写真 16 全壊木造

## (7) K-NET大谷(震度6強,調査日:1/26)

観測点は珠洲市立大谷小中学校(写真25)の敷地の北側に設置されている(写真26)。周辺には30棟の建物(うち木造建物31棟)があり、木造建物14棟が全壊していた(写真28,29)。建物の軽微な被害では外装に被害を受けた建物が見られた。建物以外の被害では、舗装の被害や斜面崩壊といった地盤の被害が見られた。

## 3.2 観測点周辺の被害状況のまとめ

各観測点周辺の被害状況を表1に示す。多くの観測点で全壊・大破といった大きな被害を受けた建物が見られた。建物以外の被害では,多くの観測点で倒壊したブロック塀が見られたほか,ほとんどの観測点で地盤の被害が見られた。

# 4. 観測された地震動の性質と建物被害との対応

調査を行った強震観測点について, 計測震度, 地

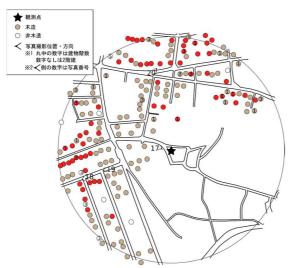


図 6 K-NET 輪島周辺の建物分布



写真 17 K-NET 輪島



写真 18 全壊木造

写真 19 全壊した木造建物 写真 20 全壊木造

動最大加速度PGA等の地震動強さ指標を表1に示している。地震動強さ指標には、建物の大きな被害と相関の高い、減衰定数20%(境、2011)における応答スペクトル値に基づく1-2秒震度、1-1.5秒震度(境ら、2023)も示している。PGAが1000cm/s²を超える記録が複数あり、特にK-NET富来では2750cm/s²と重力加速度の3倍近い値を示している。図9に、弾性加速度応答スペクトル(減衰定数5%、水平2方向ベクトル合成)を示す。図10には、過去の大地震の強震記録と、今回観測された強震記録の一部を比較して示す。図9,10の縦軸は1G=9.8m/s²である。

図9(a)より、全壊・大破といった大きな被害を受けた建物がなかったK-NET富来やJMA七尾では、震度と相関のある周期1秒以下の短周期(境ら、2002)の応答が大きい一方で周期1-2秒の応答は小さく、過去の強震記録と比較した図10より、2011年東北地方太平洋沖地震で全壊率0%であったK-NET築館(林ら、2013)同様、震度は大きくなるものの大きな建物被

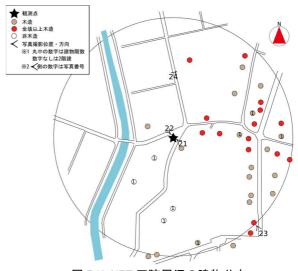


図 7 K-NET 正院周辺の建物分布



写真 21 K-NET 正院



写真 22 観測点近傍の段差



写真 23 全壊木造



写真 24 全壊木造

害は生じにくい性質の地震動であることがわかる。 図9 (b) より、全壊・大破といった大きな被害を受 けた建物が見られた観測点の強震記録は周期1-2秒 の応答が大きく、特に被害率の大きなK-NET穴水や JMA輪島では周期1-2秒で応答が2Gを超える場合が あり、大きな被害が生じた要因と考えられる。図10 より、K-NET穴水は1995年兵庫県南部地震JR鷹取と

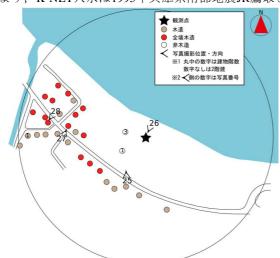


図8 K-NET 大谷周辺の建物分布





写真 25 珠洲市立大谷 小中学校

写真 26 K-NET 大谷

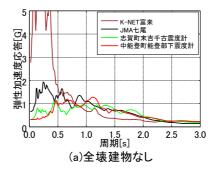




写真 27 全壊木造

写真 28 全壊木造

同程度の1-2秒応答であり、建物に対する破壊力が非 常に大きな地震動であると言える。同程度の応答に も関わらず、全壊率が半分以下であまり大きくない のは、2007年能登半島地震の際にK-NET穴水周辺の 木造建物に全壊率18.8%の被害が生じており(境ら, 2008) , 耐震性能の低い建物が既に全壊していたた めに、2024年時点では比較的耐震性能の高い建物の



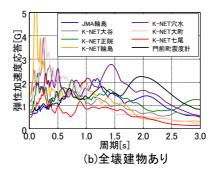


図 9 弾性加速度応答スペクトル (h=0.05, 水平2方向ベクトル合成)

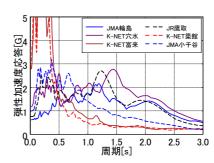


図 10 過去の強震記録との比較

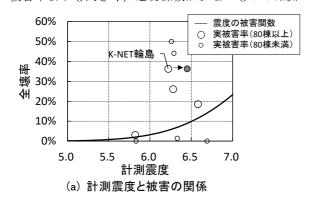
観測点周辺の被害状況と地震動強さ指標

	観測点名		建物棟数		全壊·大破棟数		全壊・大破	<b>-</b> ** ^ +=		地震動強さ			
		震度	全体	木造	全体	木造	率[%] 本[%]	木造全壊 率[%]	PGA [cm/s <sup>2</sup> ]	PGV [cm/s]	計測 震度	1-2秒 震度	1-1.5秒 震度
	志賀町末吉千古震度計	6弱	82	76	0	0	0	(0)	312.8	55.3	5.7	5.9	5.6
	K-NET富来	7	5	5	0	0	(0)	(0)	2725.0	83.7	6.4	5.51	5.55
	K-NET七尾	6弱	168	129	4	4	2.4	3.1	459.0	52.9	5.8	5.75	5.76
	K-NET穴水	7	137	129	24	24	17.5	18.6	1220.7	151.4	6.5	6.63	6.60
	JMA輪島	6強	222	207	54	54	24.3	26.1	608.5	120.5	6.2	6.30	6.25
2024年	K-NET輪島	6強	180	171	62	62	34.4	36.3	1627.6	88.7	6.2	5.99	6.02
能登半島地震	K-NET大町	6強	91	71	1	1	1.1	(1.4)	992.0	106.4	6.3	6.09	6.05
	JMA七尾	6弱	74	60	0	0	(0)	(0)	642.1	52.6	5.8	5.69	5.75
	中能登町能登部下震度計	6弱	68	58	0	0	(0)	(0)	307.0	54.5	5.7	5.9	5.7
	K-NET正院	6強	38	34	15	15	(39.5)	(44.1)	847.1	132.2	6.2	6.33	6.29
	K-NET大谷	6強	30	28	14	14	(46.7)	(50.0)	1468.5	103.1	6.2	5.99	6.01
	輪島市門前町走出震度計	7	76	63	19	18	(25.0)	(28.6)	701.9	157.8	6.5	6.61	6.37
	1995年兵庫県南部地震·JR鷹取	6強	545	207	190	123	20.5	43.1	741.6	157.2	6.4	6.64	6.65
過去の記録	2004年新潟県中越地震·JMA小千谷	6強	164	114	2	2	1.2	1.8	975.0	93.6	6.3	5.93	5.97
迴去の記録	2011年東北地方太平洋沖地震·K-NET築館	7	58	51	0	0	0.0	0.0	2765.2	105.8	6.6	5.38	5.35
	2016年能本地震•KiK-net益城	7	225	223	14	14	6.2	6.3	1313.8	1316	6.5	6.38	6.48

<sup>| 14| 6.2| 6.3| 1313.8| 131.6| 6.5| 6.38| 6.48| ※| 14| 14| 6.2| 6.3| 1313.8| 131.6| 6.5| 6.38| 6.48| ※|</sup> 建物棟数が少ない(80棟以下) 観測点の被害率は参考値として括弧つきで示す。※| 2 JR鷹取の被害率は全壕・大破棟数/建物棟数で求めた被害率に文献1)3)の補正を行った値。 ※3 JR鷹取以外の計測震度は気象庁,防災科学技術研究所より引用計測震度は気象庁,防災科学技術研究所より引用

割合が多かった可能性が考えられる。

各観測点周辺の全壊率と震度の関係を図11に示す。 図11(a)より、計測震度では短周期が卓越するK-NET 富来の被害を過大評価するなど, 右上がりの傾向が 得られない。1-1.5秒震度を用いた図11(b)では右上が りの傾向が得られるが、K-NET輪島の誤差が非常に 大きい。この誤差の要因の一つに、観測点の設置さ れた地盤の増幅特性が、観測点周辺の住宅街の地盤 の増幅特性と大きく異なることが考えられる。K-NET輪島は写真17および図12に示すように、周辺の 住宅街よりも高い丘の途中に設置されている。図13 より、図12の地点Aでは厚さ20m以上の表層地盤が存 在するのに対し、K-NET輪島の直下には表層地盤が 1mしか存在せず(中川ら, 2013), 地震動がほとん ど増幅しないと考えられる。そこでK-NET輪島の地 盤データと周辺の微地形区分から求めたスペクトル 増幅率 (図14) (境ら, 2003) (先名・翠川, 2009) を用いて周辺の計測震度(計測震度と相関の高い周 期0.1-1秒応答に基づく0.1-1秒震度から換算(境ら, 2004) ) と1-1.5秒震度を推定した。その結果、図11 に灰色のマーカーで示すように、計測震度を用いた 場合はあまり変わらないものの、1-1.5秒震度を用い た場合は右上がりの傾向を示すようになり, 表層地 盤の差が影響を与えていると考えられる結果となっ た。ただし、K-NET輪島の震度を補正した後の図11 (b) でも全体として実被害率が被害関数による推定 被害率よりも大きく,建物棟数が少ないものの珠洲



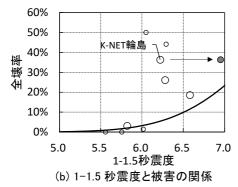


図 11 震度の被害関数と実被害率の対応

市のK-NET正院、K-NET大谷では特に差が大きい。

## 5. 建築年代分布の推定と年代別全壊率

実被害率と被害関数の誤差が大きい傾向にある要因の一つに、観測点周辺に建築年の古い建物が多かったことが考えられる。そこで、建物の外観から建築年代を推定する手法(戸田・境、2020)(汐満ら、2024)を用い、図15に示す6観測点周辺の建築年代分布と年代別全壊率の推定を行った。いずれの観測点も旧耐震基準の建物が5割以上となり、K-NET輪島と

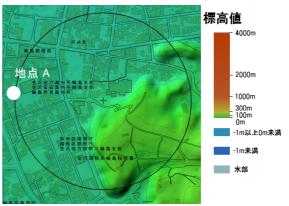


図 12 K-NET 輪島の調査範囲内の地形 (地理院地図に白を加筆)

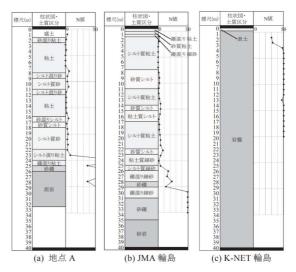


図 13 K-NET 輪島と地点 A の地盤の比較 ((中川ら, 2013)の図 10 より転載)

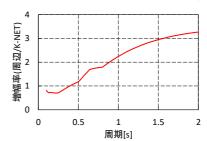


図 14 K-NET 輪島から周辺の地盤への スペクトル増幅率

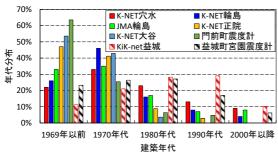


図 15 建築年代分布

JMA輪島では約7割、特に誤差の大きい珠洲市のK-NET正院とK-NET大谷では約9割を占めている。珠洲市の2観測点で周辺の建物のほとんどが旧耐震基準であったことは、図11でこれら2観測点の誤差が特に大きかった原因の一つと考えられる。図15には比較として2016年熊本地震のKiK-net益城、益城町宮園震度計の年代分布を斜線で示しており、能登半島地震の観測点ではこれら2観測点よりも旧耐震基準の割合が多いことがわかる。建築年代別の全壊率を図16に示す。正院、大谷は建物棟数が少ないため参考値として斜線で示している。図16より、2000年以降の建物に被害が無い一方で旧耐震基準では20%以上と甚大な被害が生じており、建築年代が古い建物ほど全壊率が大きくなることがわかる。

2023年度の戸建住宅ストック総数(国土交通省, 2023)における旧耐震基準の割合が約3割であること から、これらの観測点周辺には古い建物が全国平均 よりも多く存在しており、このことが被害関数を上 回る大きな被害となった一因と考えられる。

# 6. 非線形地震応答解析による地震動の破壊 カの検証

最後に,一自由度系を用いた非線形地震応答解析 により,観測された地震動の破壊力を検証した。

# 6.1 線形地震応答解析による地震動の破壊力 の検証

復元力特性モデルは、大変形と繰り返しによる劣化を考慮した修正Takeda-Slipモデル(汐満ら,2018)を用いた(図17)。モデルのパラメータは、過去に行

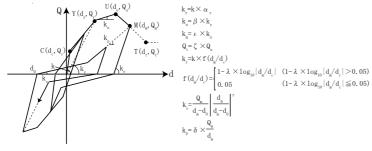


図 17 修正 Takeda-Slip モデル(汐満ら, 2018)

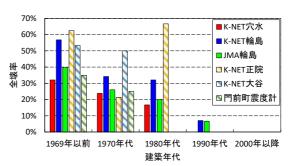


図 16 建築年代別全壊率

われた実大振動実験結果を用いて算出した(汐満ら, 2024)。設定したパラメータを表3に示す。減衰定数 は5%とした。

地震応答解析は、様々な耐力の建物を対象として、 降伏ベースシア係数Cyを0.1~2.0まで0.1刻みで変化 させ、弾性周期Tを式(1)に示すCyとの関係式(境・飯塚, 2009)から求めた。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h \cdot \alpha_y \cdot R_y}{g \cdot C_y}} \qquad \cdots \quad (1)$$

ここで、h: 高さ[m] (=2階建てを想定した等価高さ4.5m18) ), $\alpha_y$ :降伏点剛性低下率, $R_y$ :降伏変形角,g:重力加速度である。入力地震動は周期0-3秒平均速度応答が平均となる2つの平均方向(境・熊本,2010)を用い,同じ $C_y$ の各方向の最大変形角を平均し,その $C_y$ の最大変形角とした。

#### 6.2 地震応答解析結果

今回の地震における記録のCyと最大変形角の関係を図18に、今回の地震の一部と過去の強震記録、具体的には1995年兵庫県南部地震JR鷹取、2016年熊本地震KiK-net益城、2011年東北地方太平洋沖地震K-NET築館のCyと最大変形角の関係を図19に示す。図の上部には、対応する弾性周期を記している。全壊に至る変形角を1/15rad(損害保険料率算定会、1988)と考えると、K-NET富来はすべてのCy、K-NET大町はCy=0.2以上でこれを下回っている。鈴木らによる、対数正規分布を用いた年代別の耐力分布(鈴木・境、2011)によれば、旧耐震基準建物のCyの最頻値は0.3-0.4程度であるため、これらの観測点周辺の全壊率が

表3 復元力特性モデルのパラメータ

$Q_c/Q_y$	0.30	$d_u[rad]$	0.025
$\alpha_y$	0.40	λ	0.32
β	0.15	γ	1.31
ε	-0.43	δ	1.11
ζ	0.55	x	1.06

0,1.4%と小さいことと対応している。今回の地震におけるその他の記録は、Cy=0.3以下で1/15radを超えており、JR鷹取のようにCyが低いと変形が急激に大きくなる傾向が見られる。そのため、これらの記録は、旧耐震基準のような古い木造家屋に大きな被害を引き起こす、破壊力の大きい地震動であると言える。年代別の全壊率を示す図16では、耐力の高い新しい建物に大きな被害を受けた建物は少ない一方、耐力の低い旧耐震基準の建物に多くの被害が生じており、地震応答解析の結果でCyが低いと変形が急激に大きくなる傾向と対応している。

## 6.3 2023年5月5日能登半島沖の地震の影響

珠洲市にある観測点K-NET大谷、K-NET正院は、2023年5月5日に発生した能登半島沖の地震で、それぞれ震度6弱、震度6強の揺れが観測されているため、今回の地震で生じた建物被害に影響していた可能性がある。そこで、それぞれの地震における記録を繋げて入力する地震応答解析を行い、2023年5月5日の地震の揺れが、今回の地震における建物被害に及ぼした影響を検証した。地震動の方向は平均方向(境・熊本、2010)を用い、パラメータ等の条件は、前述した解析と同じである。

応答解析結果の例として、Cv=0.4のモデルにK-

NET正院のNS方向(平均方向の一つ)を入力した際 の荷重変位関係を図20に示す。各図の入力地震動は, (a)は2023年の記録, (b)は2024年の記録(2023年の記 録を入力後), (c)は2024年の記録, となっている。 図20(b)を見ると, 2024年の記録が入力される時には, (a)2023年の記録で経験した最大変形点を指向してい る(モデルの履歴則は図17参照。ただし,正確には繰 り返しによる劣化があるので, 経験最大変形点より もやや外側の点を指向する) ため、2023年の記録の 影響で、周期がやや伸びた所に2024年の記録が入っ たことになる。しかし、図中に示した最大変形角 (Rmax) は、(b)2023年の記録を入力後に2024年の記 録を入力した場合と、(c)2024年の記録のみを入力し た場合で大きな差はなく、2023年の記録の有無は、 2024年の記録を受けた時の最大変形に影響していな いことがわかる。

その他の応答解析の結果として、降伏ベースシア係数 $C_y$ と最大変形角の関係を図21に示す。図21より、ほとんどの $C_y$ で、「2024年の記録のみ」と「2023+2024年の記録」で、最大変形角はほぼ同じである。よって、今回の地震の建物被害に、2023年5月5日の地震の影響はほとんど無かったという結果になった。

#### 7. まとめ

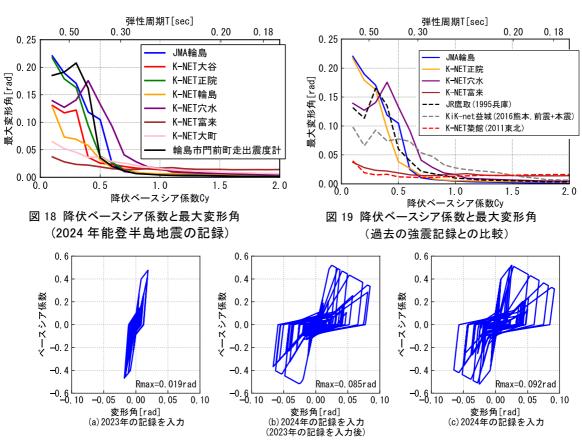


図 20 地震応答解析による荷重変位関係(入力:K-NET 正院 NS, C<sub>v</sub>=0.4, 図中 Rmax:最大変形角)

2024年1月1日に発生した能登半島地震において、強震観測点周辺の被害調査を行った。多くの観測点周辺で全壊・大破といった大きな被害を受けた建物が見られたが、震度7にも関わらず大きな被害を受けた建物がない観測点もあった。発生した地震動の性質を分析した結果、全壊・大破した建物が見られた観測点では建物の大きな被害と相関の高い周期1-2秒の応答が大きく、このことが大きな被害を引き起こしたと考えられる。震度7にも関わらず大きな被害を受けた建物がなかったK-NET富来では、震度と相関のある周期1秒以下の応答が卓越する一方で周期1-2秒の応答は小さく、このことが大きな震度を観測しながら全壊・大破といった大きな被害が生じなかった一因と考えられる。

次に、観測点周辺の木造建物の建築年代と年代別の全壊率を推定したところ、観測点周辺に古い建物が多いことと、古い建物ほど被害が大きく、2000年以降の建物には大きな被害が生じていないことがわかった。

最後に、非線形地震応答解析を行い地震動の破壊力の検証を行った結果、全壊した建物のない観測点の破壊力は小さい一方で、大きな被害の見られた観測点では旧耐震基準のような耐震性の低い建物に対する破壊力が大きく、古い建物ほど大きな被害が生じるという実際の被害と対応する結果が得られた。また、2023年5月5日の地震の揺れが2024年能登半島地震の建物被害に及ぼした影響を調べたところ、ほとんど影響は見られないという結果が得られた。

## 謝辞

現地の方々には、被災されているにも関わらず 様々なご協力をいただきました。被害調査は、京都 大学大学院工学研究科亀井健司氏、山形大学工学部 廣瀬佳亮氏と共同で行いました。調査を行うにあた り、自然災害研究協議会の支援を受けました。強震 記録は防災科学技術研究所、気象庁、鉄道総合技術 研究所より提供していただきました。地図の作成に 国土地理院地球地図日本のデータを利用しました。

## 参考文献

境有紀(2013):2011年東北地方太平洋沖地震で発生した地震動と建物被害の対応性-建物の大きな被害をより正確に推定する地震動強さ指標-,日本建築学会構造系論文集,第78巻,第683号,pp.35-40.境有紀,中澤駿佑,亀井健司(2023):建物被害から見た関東平野で発生する地震動の性質,第51回地盤

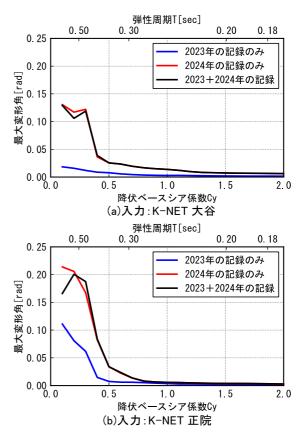


図 21 降伏ベースシア係数と最大変形角 (2023/5/5 の地震の記録を繋げて入力した場合)

震動シンポジウム.pp.60-68.

境有紀,神野達夫,纐纈一起(2002):建物被害と人体感覚を考慮した震度算定方法の提案,第11回日本地震工学シンポジウム論文集,CD-ROM.

林佑樹, 飯塚裕暁, 汐満将史, 小林雄, 境有紀 (2013): 2011年東北地方太平洋沖地震の宮城県における強 震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性, 日本地震工学会論文集, 第13巻, 第5号, pp.62-101.

境有紀,野尻真介,熊本匠,田中佑典(2008):2007 年能登半島地震における強震観測点周辺の被害状 況と地震動との対応性,日本地震工学会論文集,第 8巻,第3号,79-106.

国土地理院: 地理院地図 (電子国土Web) (https://maps.gsi.go.jp/, 2024/6/27閲覧)

中川貴文, 佐藤弘美, 多幾山法子, 腰原幹雄, 林康裕 (2013): 2007年能登半島地震における木造住宅の 被害の再現, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第688号.

先名重樹,翠川三郎(2009):地形・地盤分類に基づく地震動のスペクトル増幅率の推定,日本地震工学会論文集,第9巻,第4号,pp.11-25.

境有紀, 津野靖士, 工藤一喜, 壁谷澤寿海 (2003) : 改正建築基準法の解放工学的基盤波を想定した表 層地盤増幅特性の簡便評価法, 日本建築学会構造 系論文集, 第565号, 73-78.

境有紀,神野達夫,纐纈一起(2004):震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案,日本建築学会構造系論文集,第585号,71-76. 戸田和徳,境有紀(2020):木造建物の建築年を外観写真から判定する方法,日本地震工学会論文集,第20巻,第4号,pp.56-65.

汐満将史,中澤駿佑,境有紀,松井貴宏,村嶋美波, 江口直希(2024):2021年福島県沖の地震における 強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応 性,日本地震工学会論文集,第24巻,第1号,pp.148-177.

国土交通省(2023): 令和5年度 住宅経済関連データ, (https://www.mlit.go.jp/statistics/details/t-jutaku-2\_tk\_000002.html, 2024/3/29閲覧)

汐満将史,境有紀,五十田博,荒木康弘,松森泰造 (2018):既存木造建物を対象とした復元力特性 モデルの開発,日本建築学会構造系論文集,第83巻, 第747号,pp.717-726.

汐満将史,中澤駿佑,境有紀(2024):2024 年能登 半島地震における建物被害と発生した地震動の破 壊力(その2)非線形地震応答解析による地震動の 破壊力の検証,日本建築学会大会梗概集,構造II, pp.9-10.

境有紀,飯塚裕暁(2009):非線形地震応答解析による地震被害推定を目的とした平均的な木造建物群モデルの構築,日本地震工学会論文集,第9巻,第1号,pp.32-45.

損害保険料率算定会 (1988):木造住宅の損壊被害率に関する研究 その2,地震保険調査研究22境有紀,熊本匠 (2010):地震動の方向性の定量的な検討と地震被害推定のための平均方向の提案,日本地震工学会論文集,第10巻,第5号,pp.1-20.

鈴木達矢,境有紀(2011):年代別被害関数を用いた 木造建物の経年劣化と耐震規定による耐力変化の 推定,日本地震工学会論文集,第11巻,第3号,73-84.

# カラー化された写真の過去の災害写真を用いた 防災教育の実践とその効果の検討

## 朝位孝二

山口大学大学院創成科学研究科

## 要旨

本研究では白黒で撮影された過去の災害写真をカラー化して、それを防災教育に用いることを念頭におき、元画像の白黒写真とカラー化された写真を比較して、それらの印象について山口県、島根県、鳥取県の小学生、中学生を対象にアンケート調査を行った。どの小中学校においても現実感についてはカラー側に、恐怖感については白黒側に感じることが分かった。その選択理由として現実感はカラーが実際にありそうな色であること、恐怖感では色彩がないので怖いとうことであった。展示方法として白黒とカラーの併示が良いとの意見が最も多かった。

#### 1. はじめに

我が国では毎年のように豪雨災害が発生している。 しかし、それは日本全体で見た場合であり、ある特 定の地域に着目すると、そこで毎年豪雨災害が発生 しているというわけではない。治水事業の効果もあ り、長年にわたって豪雨災害が発生していない地域 もある。そのような地域では、防災意識や危機感が 薄れている可能性があり、事防災教育や啓蒙が必要 となってくる。また地域の災害リスクや災害ポテン シャルを理解する上で、その地域で過去に発生した 災害について学習することが有用と考えられる。

過去に発生した災害について効果的に学習する方法の一つとして、当時の災害写真を用いた防災教育が有効と考えられる。しかしながら、昭和40年代以前に撮影された記録用の災害写真は白黒の場合が多いため、現実感に乏しい恐れがある。近年のAI技術の進歩は目覚ましく、白黒の写真や動画をカラー化させることができる。そこで白黒で撮影された災害写真をカラー化した写真を用いた防災教育はその効果が大きくなることが期待される。井村(2021)は1914年の桜島の噴火について白黒で撮影された写真をカラー化し、桜島大正噴火啓発資料(A1版ボード10枚)を作成し、庭児島県防災研修センターで展示した。そのボードを見た見学者からは現実感がわいたなどの感想が寄せられたということでカラー化することの効果があったことを報告している。防災教

育においてカラー化された災害写真の利用は効果が あることは期待されるが、それが実際にどの程度の 効果があるのかは不明な点も多い。本研究の目的は、 水害や土砂災害を撮影したモノクローム写真をカラ 一化した写真を用いることによる防災教育効果の向 上について検討することである。

そこで著者ら(表-1に研究参加者を記載)は京都 大学防災研究所地域防災実践型共同研究(特定)の 支援を受けて令和4年度(2022年度)と令和5年度

(2023年度)において山口県,広島県,島根県,鳥取県で実際にカラー化した写真を用いた防災教育を実行し,その効果を観測した。後述するように2年間で12回の調査を実施した。すべての結果を紹介する紙面的余裕はないため本稿ではその一部の紹介にと

表-1 研究参加者

氏名	所属・職名
朝位孝二	山口大学大学院・教授
(代表者)	
浅田純作	松江工業高等専門学校・教授
五十嵐晃	京都大学防災研究所・教授
楮原京子	山口大学教育学部・准教授
梶川勇樹	鳥取大学大学院・准教授
川池健司	京都大学防災研究所・教授
鈴木素之	山口大学大学院・教授
田中健路	広島工業大学環境学部・教授
渡壁守正	広島工業大学環境学部・教授

どめる。

令和4年度に朝位(2023)は山口県の佐波川流域の 防府市立新田小学校、防府市立右田小学校、防府市 立佐波中学校を対象に行ったアンケート調査の結果 に基づいて考察を行った。その結果、現実感、恐怖 感ともに白黒とカラーに票が分かれる結果を報告し た。特に恐怖感についてこの傾向が強い。中国地方 の他流域の小学生についても同様の傾向があるのか を検討した。本稿ではその結果について述べる。

## 2. 調査概要

## 2.1 白黒写真のカラー化

令和4年度では白黒写真のカラー化はwebから無料で利用できるカラー化サイトを利用した。用いたサイトはData Chef, siggraph2016\_colorization, Image Colorizerの三つである。同じ白黒写真のカラー化でも用いたサイトで結果が若干異なってくる。本研究では著者の主観ではあるが、最もカラー化が上手く

行えたと判断したカラー化写真をアンケート調査に 用いた。

令和5年度ではカラー化サイトは使用せず、すべて Adobe社のPhotoshopでカラー化を行った。

#### 2.2 アンケート調査概要

令和 4 年度と令和 5 年度に行ったアンケート対象者と調査時期を表-2 に示す。No.1 の新田小学校では研究代表者が河川氾濫、高潮に関する防災授業を一通り実施した後に白黒写真とカラー化写真を見せてアンケート調査を行った。つまり防災授業に白黒・カラー化写真を用いたわけはない。No.2 はアンケート質問票(写真を含む)を PDF ファイルにして webサイトに掲載し、google form を利用してアンケートに回答して頂いた。No3 と No.4 は他の講師による防災授業(地震、津波など)の一部としてアンケートを取った。この場合も防災授業内容と白黒・カラー化写真には直接の関連はない。No.5 では防災士の講習会として研究代表者が担当した時間(津波に関す

表-2 アンケート調査実施状況

No.	調査日	実施場所	対象者	人数	調査方法
1	2021年12月20日	防府市立新田 小学校	小学5年生	64 名	対面形式による調査
2	2022年1月19日~26日	オンライン	山口県土木県 建築部職員	175 名	web アンケート
3	2022年6月28日	防府市立佐波 中学校	中学2年生	82 名	対面形式によ る調査
4	2022年8月29日	防府市立右田 小学校	小学5年生	70 名	対面形式によ る調査
5	2022年10月1日	山口県防災士 講習会	講習会参加者	77 名	対面形式によ る調査
6	2022年10月30日	防府市メバル 公園	防災イベント 参加者	99名	対面形式による調査
7	2023年8月19日,20日,22日	防府市青少年 科学館ソラー ル	防災イベント 参加者	81 名	対面形式による調査
8	2023年10月6日	松江市立城北 小学校	小学4年生	82 名	対面形式による調査
9	2023年11月4日,5日	松江市生馬公 民館	防災イベント 参加者	63 名	対面形式によ る調査
10	2022年8月29日	鳥取市立散岐 小学校	小学 4, 5, 6 年 生	小学生36名	書面による調査
11	2023年11月20日	防府市立佐波 小学校	小学5年生	小学生 78 名	対面形式によ る調査
12	2022年10月30日	防府市立佐波 中学校	中学2年生	中学生 69 名	対面形式によ る調査

る講義)の一部を利用してアンケート調査を行った。 No.6 では新築地町防災広場(通称、メバル公園)で 実施された防災イベントにおいて、国土交通省山口 河川国道事務所の展示ブースの一部を借りて、展示 ブースに訪れる方々に適宜声掛けをしてアンケート 調査を実施した。

No.7は防府市青少年科学館ソラールで開催された防災イベントにパネルを設置して、来訪者に適宜声かけをしてアンケート調査を行った。No.8は斐伊川、大橋川の氾濫について防災授業を行い、授業中に写真を示しながらアンケートを取った。No.10, No.11, No12も同様で、講義内容に合わせながら写真を見せて講義中にアンケートを取った。令和4年度とは異なり、防災授業の内容の一部として白黒・カラー化写真を用いた。No.9では松江市生馬地域では毎年地域のイベントとして「名尾が丘まつり」が生馬公民館開催されている。その一室を防災に関するブースとしてパネルを設置した。ブースに訪れる方々に適宜声掛けをしてアンケート調査を実施した。

#### 3. 調査結果

## 3.1 白黒災害写真とそのカラー化写真の印象

令和 5 年度の佐波小学校および佐波中学校の調査で用いた災害写真とそれらを Photoshop でカラー化した写真を付録の写真-1~写真-6 に示す。これらの写真において左側が元画像、右側がカラー化画像を記載している。元写真は山口県文書館所属のデジタル画像を用いた。

城北小学校の調査で用いた災害写真とそれらを Photoshopでカラー化した写真を付録の写真-7~写真-9に示す。出典は建設省出雲工事事務所から出版された斐伊川誌である。写真-9以外は元画像の質が良くないためかカラーが上手く行われなかった。斐伊川における過去の災害写真が数多くなかったため,このまま使用した。

散岐小学校の調査で用いた災害写真とそれらを Photoshop でカラー化した写真を付録の写真-10~写 真-15 に示す。出典は建設省鳥取工事事務所から出版 された千代川史である。

小中学校の各写真の結果の票数を合計したものを, その小中学校の総合的な結果とする。図-1に現実感 の結果を,図-2に恐怖感の結果を示す.縦軸は割合 で示している。

現実感について最も回答割合の高い回答は全ての 小中学校でカラーである。特にカラーでは佐波小学校と佐波中学校の割合はほぼ同一で,城北小学校と 散岐小学校の割合はほぼ同一である。佐波小学校と 佐波中学校の回答割合は他の回答選択枝においても

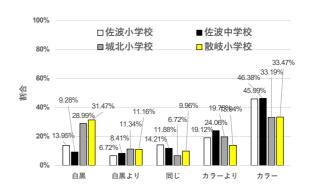


図-1 現実感の比較結果 (佐波小学校 N=387, 佐波中学校 N=345, 城北小学校 N=238, 散岐小学校 N=251)

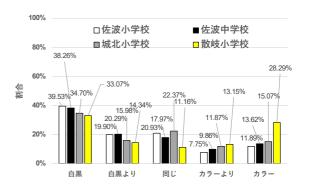


図-2 恐怖感の比較結果 (佐波小学校 N=387, 佐波中学校 N=345, 城北小学校 N=219, 散岐小学校 N=251)

概ね同一であり、学校間の差は顕著ではない。次点は城北小学校と散岐小学校では白黒であるが、佐波小学校、佐波中学校はカラーよりとなっている。学校により回答傾向に相違は見受けられるが、カラーに最も多く回答が集まること、白黒にも少なからず回答があるという点では令和4度の小中学校の調査と同じ傾向である。

恐怖感についても佐波小学校と佐波中学校の結果 は概ね同様の割合を示している。特に白黒の回答割 合はほぼ同じである。また、この回答割合が最も高 い. 他の小学校においても白黒が最も高い割合を示 している。佐波小学校, 佐波中学校および城北小学 校の回答の傾向は概ね一致している。散岐小学校で は他の学校と比較してカラーの回答割合が高い。現 実感と同様、学校によって回答傾向が異なる場合も あるが白黒の回答割合が最も高く,全体的に白黒側 に回答が集まっている。恐怖感については白黒に回 答が集まる傾向は令和4度の小中学校の傾向と同じ である。なお, 散岐小学校の回答にカラーは多いの は他の小中学校と異なり書面による調査であること も影響している可能性がある。つまり書面に比較画 像があるため, ある程度時間をかけて比較を行うこ とが可能であったことが散岐小学校の回答傾向異な

表-3 選択理由に対する回答選択枝

現実感	カラー側回答	「カラーは現実にありそうな色だから」, 「白黒は迫力があるから」, 「カラーは迫力 があるから」, 「カラーはテレビなどで見る 映像に近いから」, 「その他」
	白黒側回答	「カラー写真の色はありえそうもなく、うそのようなところがあるから」、「白黒は迫力があるから」、「その他」
恐怖感	カラー側回答	「カラーは現実的なのでこわさが伝わってくるから」、「カラーは迫力があるから」、「カラーはウカがあるから」、「カラーはテレビなどで見る映像に近いから」、「その他」
	白黒側回答	「カラー写真の色はありえそうもなく, うそのようなのでこわくなかったから」, 「白黒は迫力があるから」, 「なんとなく白と黒だけの写真はこわく感じるから」, 「その他」

った理由かもしれない。

### 3.2 回答の選択理由

この節では散岐小学校、佐波小学校、佐波中学校の結果をまとめて記す。表-3に散岐小学校、佐波小学校、佐波小学校の回答選択枝を示す。このため城北小学校の回答選択枝は表-3とは異なるためここでは城北小学校の結果は除外した。

現実感のカラー側回答の選択理由を図-3 に示す。 最も多い選択理由は佐波小中学校では「カラーは現 実にありそうな色だから」であるが散岐小学校では 「カラーはテレビなどで見る映像に近いから」であ った。散岐小学校の次点は「カラーは現実にありそ うな色だから」であるが、これと筆頭回答はほぼ互 角となっている。佐波小中学校の次点も「カラーは テレビなどで見る映像に近いから」である。

その他の意見として次の意見があった。当時の状況が分かるから(散岐小6年生),リアルさが感じられたから(佐波中2年生),海とかを見ると、色が濁っていたりするから、被害の程度が伺える(佐波中2年生),白黒よりも鮮明になって,本当にそんなことがあったと思えるから(佐波中2年生),白黒の世界はないから(佐波中2年生)。

現実感の白黒側回答の選択理由を図-4に示す。最も多い選択理由は散岐小学校では「カラー写真の色はありえそうもなく、うそのようなところがあるから」であり、佐波小学校と中学校では「白黒は迫力があるから」であった。散岐小学校の次点は「白黒は迫力があるから」であり、佐波小中学校の次点は「カラー写真の色はありえそうもなく、うそのようなところがあるから」であった。散岐小学校と佐波小中学校で理由が逆転していた。

その他の意見として次の意見があった.パッと見た時に不自然に感じたから(4年),色の濃さによる違和感があまりなく、見やすかったからです(4年),当時の状況が分かるから(4年),見にくいものがあるから(4年),元の写真の方が現実的だから(4年),

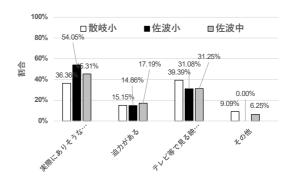


図-3 現実感のカラー側の選択理由 (散岐小 N=33, 佐波小 N=74, 佐波中 N=64)

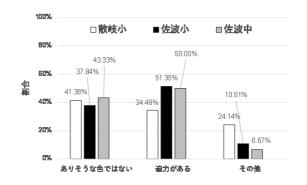


図-4 現実感の白黒側の選択理由 (散岐小 N=29, 佐波小 N=37, 佐波中 N=30)

白黒はこわくないから(4年),カラーは少し優しい感じがする(5年),昔の写真と知ったうえで見ると,白黒の方がリアリティがある(6年)。元々白黒だったものをカラーにすると不自然なものが多かった(6年),色が白黒だから、その深刻さが伝わる(中学2年),年代が昔で、今のAIよりも色が暗そうだから(中学2年)。自由意見を見るとカラーに違和感がある意見があることが見受けられる。

恐怖感のカラー側回答の選択理由を図-5 に示す。 最も多い選択理由は全てで「カラーは現実的なので 怖さが伝わってくるから」である。次点は「カラー はテレビなどで見る映像に近いから」である. ただ し、現実感でカラー側の回答をした回答者が恐怖感 もカラー側の回答をしているわけではない。

その他の意見として次の意見があった. 動きのあるもののカラーはこわさを感じた(6年), 水の色や土の状態がより伝わってきたから(中学2年)。

恐怖感の白黒側回答の選択理由を図-6 に示す. 最も多い選択理由は「なんとなく白と黒だけの写真はこわく感じるから」である。次点は「白黒は迫力があるから」である。ここでは詳細な結果を示していないが、ソラールと城北小学校における同様の調査

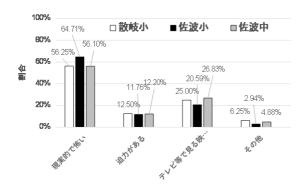


図-5 恐怖感のカラー側の選択理由 (散岐小 N=32, 佐波小 N=31, 佐波中 N=41)

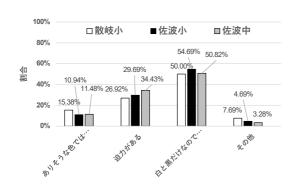


図-6 恐怖感の白黒側の選択理由 (散岐小 N=26, 佐波小 N=64, 佐波中 N=61)

においても白黒であることに恐怖を感じているとい う理由が最も多かった。

その他の意見として次の意見があった。本当にあったことが伝わる(6年),昔は写真は白黒でほんとうにそんなことがあったと思いやすかったから(6年),白黒だと昔本当にあったという感じがする(佐波小5年),おばけや悪霊が出てきそうだから(佐波中2年),白黒の方が昔感が出て怖く見える(佐波中2年)

#### 3.3 白黒災害写真とカラー化写真の展示方法

散岐小学校、佐波小学校、佐波中学校で行った展示方法に関するアンケート結果を図-7に示す。回答選択枝は次の通りである.「白黒とカラーの両者を展示するのが良い」、「元画像の白黒写真だけを展示すれば良い」、「カラー化した写真だけを展示すれば良い」、「その他(ご自由にお書きください。)」. 散岐小学校、佐波小学校、佐波中学校ともに同じ選択枝である。

最も多い回答は「白黒とカラーの両者を展示する のが良い」であった。その他として次のような自由 意見があった。元画像が白黒なら白黒、カラーなら カラーを展示する方が良い(6年)、こわそうに見え

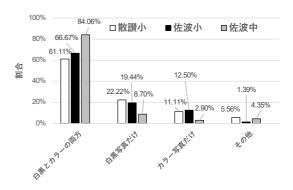


図-7 展示方法 (散岐小 N=36, 佐波小 N=72, 佐波中 N=69)

る、または現実に見える方を採用したらいと思う。 (4年),元の写真が白黒なら白黒だけ、元の写真がカラーならカラーだけで良いと思う(佐波中2年), それぞれ、もとの写真を使った方がリアルだと思った(佐波中2年),白黒写真は絶対に展示する。また、普段見慣れている海や空などの変化が分かるものはカラーもつけた方が良いと思う(佐波中2年),両方+どのような状況か一言だけでも説明がほしい,川の色や建物の色によって、迫力があり、現実味をおびる写真であればカラーの方が良いと思う(佐波中2年)。

#### 4. おわりに

本稿は2年間の調査結果の一部を紹介したもので ある。本稿で紹介した内容を以下のようにまとめる。

## 1) 白黒災害写真とそのカラー化写真の印象

佐波小学校、佐波中学校、城北小学校、散岐小学校で調査を行った。現実感については 佐波小学校、佐波中学校はカラー側回答が70%程度を占めた。カラー側回答が多いのは令和4年度調査と同様である。一方、城北小学校、散岐小学校ではカラー側回答と白黒側回答がほぼ匹敵しており二極化の傾向を示した。恐怖感についてはいずれの小中学校も白黒側の回答が多かった。これも令和4年度の回答傾向と一致する。

#### 2) 回答の選択理由

現実感においてカラー側を選択した理由は「実際にありそうな色であるから」が最も多かった。一方, 白黒側を回答した理由は「カラーはありそうにない 色合い」と「迫力がある」に分かれていた。

恐怖感においてカラー側を選択した理由は「現実に近いから怖かった」が最も多かった。一方,白黒側を選択した理由は「白黒だけは色がついていないのでカラーよりも怖く感じたから」が最も多かった。

恐怖感において白黒側を選択した回答者は多いが、 災害であることに恐怖を感じているよりも白黒であ るから恐怖を感じている場合があるようである。

#### 3) 白黒災害写真とカラー化写真の展示方法

白黒写真とそれをカラー化した写真をどのように 展示すれば良いかについてアンケート調査を行った。 その結果,「白黒とカラーの両者を展示するのが良 い」が圧倒的に多かった。自由意見としては「元の 写真が白黒なら白黒だけ、元の写真がカラーならカ ラーだけで良いと思う」があった。

2年間にわたり白黒で撮影された過去の災害写真をカラー化した写真の防災教育への活用について検討を行ってきた。カラー化写真を用いる利用することは、過去の災害についてある程度の分かり易さ、とくに現実化の強化については効果があるものと思われる。一方で恐怖感については白黒のままで良いと思われる。今回の調査では被験者に白黒写真とカラー化写真を同時に見せたが、先に白黒である元写真を見せ、次にカラー化写真を見せることが良いように思わる。なおカラーで撮影された写真は白黒にする必要はないものと考える。

#### 謝辞

朝位研究室の元卒論生である若澤啓太氏,山田暁 氏,松尾岬氏は本研究の進展に直接貢献していただ きました。またアンケート調査に協力して頂いた各小中学校、関係機関(山口県土木建築部、山口県防災危機管理課、国土交通省山口河川国道事務所、防府市)、資料を提供して頂いた山口県土木建築部、国土交通省山口河川国道事務所、国土交通省出雲河川事務所、国土交通省島取河川国道事務所、国土交通省三次河川国道事務所には大変お世話になりました。ここに記し深甚なる謝意を表します。

#### 参考文献

朝位孝二(2023):カラー化された過去の災害写真を用いた防災教育の実践とその効果の検討,

https://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/285712

井村隆介(2021): (人工知能)技術を利用した桜島大正大噴火(1914年)写真のカラー化とそれを活用した啓発活動,第40回日本自然災害学会学術講演会,III-7-3,pp.169-170.

建設省出雲工事事務所(1995):斐伊川誌.

建設省中国地方建設局鳥取工事事務所(1978):千代川史.

山口県文書館:佐波川の水害,

https://archives.pref.yamaguchi.lg.jp/document-search/ndle/2433/285712

## 付 録

佐波小学校, 佐波中学校で使用した写真(佐波川流域の氾濫) 写真-1~6



(1)元画像



(2)カラー化画像 (Photoshop)

写真-1 大正7年 右田村





(1)元画像

(2)カラー化画像 (Photoshop)

写真-2 大正7年 右田村







(2)カラー化画像 (Photoshop)

写真-3 大正7年 中関村



(1)元画像



(2)カラー化画像(Photoshop)

写真-4 大正7年 小野村



(1)元画像



(2)カラー化画像 (Photoshop)

写真-5 大正7年 出雲村



(1)元画像



(2)カラー化画像 (Photoshop)

写真-6 昭和26年 防府市上右田

城北小学校で使用した写真(斐伊川流域の氾濫) 写真-7~9



(1)元画像



(2)カラー化画像 (Photoshop)

写真-7 昭和18年 出雲市上津堤防決壊



(1)元画像



(2)カラー化画像 (Photoshop)

写真-8 昭和47年 松江市松江駅前



(1)元画像



(2)カラー化画像 (Photoshop)

写真-9 昭和47年 斐川町

# 散岐小学校で使用した写真(千代川流域の氾濫) 写真-10~15





(1)元画像 (2)カラー化画像 (Photoshop) 写真-10 大正元年 丸山につながれていた湯所橋





(2)カラー化画像 (Photoshop)

(1)元画像 写真-11 大正元年







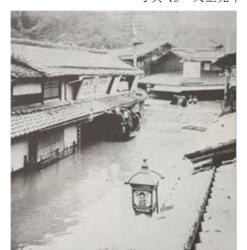
(2)カラー化画像 (Photoshop)

写真-12 大正元年



(1)元画像

(2)カラー化画像(Photoshop) 写真-13 大正元年 鳥取市本町1丁目



(1)元画像



(2)カラー化画像 (Photoshop)

写真-14 大正7年 鳥取市大工町頭



(1)元画像



(2)カラー化画像 (Photoshop)

写真-15 昭和36年 曳田橋の惨状

# 第61回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集

2024年9月21日

発行:京都大学防災研究所 自然災害研究協議会

議長:池田 芳樹(京都大学防災研究所)

王 功輝 (京都大学防災研究所・自然災害研究協議会総務)

(お問い合せ) 電話:0774-38-4347

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