

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 El-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）

閉会挨拶 王 功輝（京都大学防災研究所）

目次

【科学研究費補助金・特別研究促進費による突発災害調査研究令和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 1
平松 良浩（金沢大学）

【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）

【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
汐満 将史（山形大学工学部）

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

- リビアの Derna (El-Bilad) and Abu Mansour ダム決壊洪水に関する災害後緊急調査
..... 41
角 哲也（京都大学防災研究所）

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

- 「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）

【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¹・岡田知己²・吉田圭佑²・高木涼太²・篠原雅尚³
・酒井慎一⁴・蔵下英司³・西村卓也⁵・太田雄策²・木下陽平⁶
・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⁵・荒木英一郎¹¹・森下知晃¹・鹿児島渉悟¹²・石山達也²
・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⁵・浅野公之⁵・大堀道広¹⁷・村田 晶¹・石川浩一郎¹⁸
・山岸邦彰¹⁹・須田達¹⁹・山崎新太郎⁵・青木賢人²⁰・林 紀代美²⁰
・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²⁵・松本 聡²⁶・江本賢太郎²⁶・山中佳子²⁷・勝俣 啓²⁸
・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・卜部厚志³⁴・片岡香子³⁴
・高清水康博³⁵・永松伸吾³⁶・由比政年¹・犬飼直之³⁷・榎田真也¹
・有田 守³²・馬場俊孝³⁸・二宮順一¹・郷右近英臣³⁹・林 豊⁴⁰
・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1 12のテーマの研究分担者

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

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

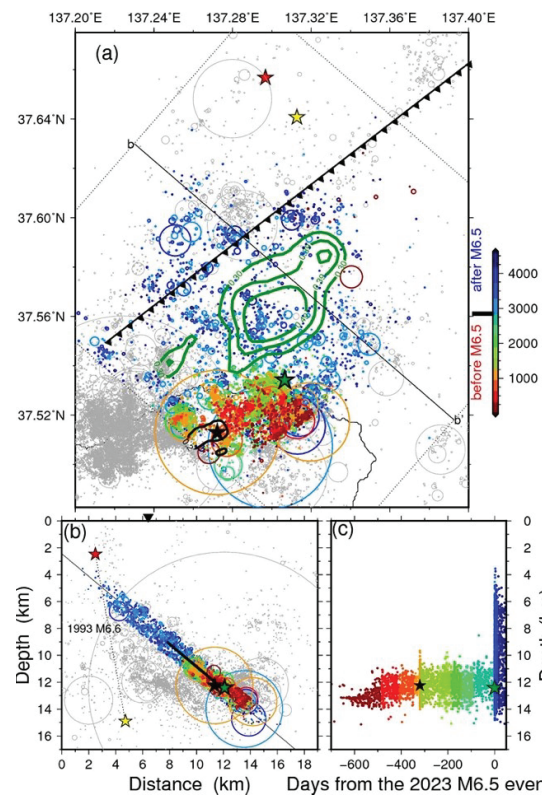


図-1 能登半島の地震活動：珠洲沖活断層セグメント・1993年M6.6地震と2023年M6.5地震の関係 (Yoshida et al., 2023b)。

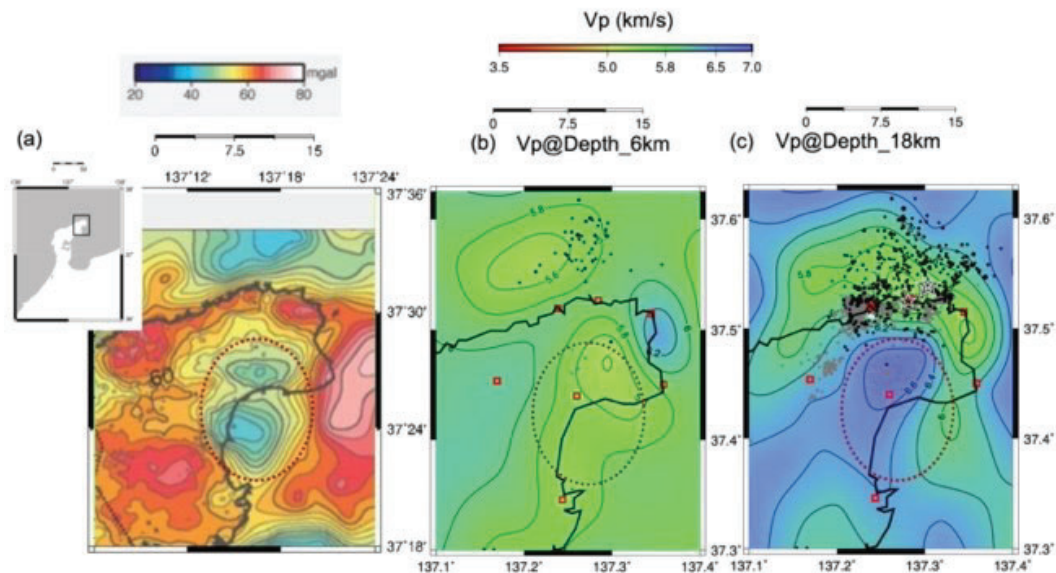


図-2 能登半島北東部の地殻構造 (Okada et al., 2024)。a) 澤田・他 (2012)によるブーゲー重力異常。赤点線の楕円は低重力異常域を示す。(b) 深さ6kmのVp、灰色は2018年から2023年のM6.5地震前までの地震。白星は2022年M5.4の地震。黒は2023年のM6.5地震以降の地震。黒星は2023年M6.5の地震。赤四角は使用した観測点。(c) 深さ18kmのVp。

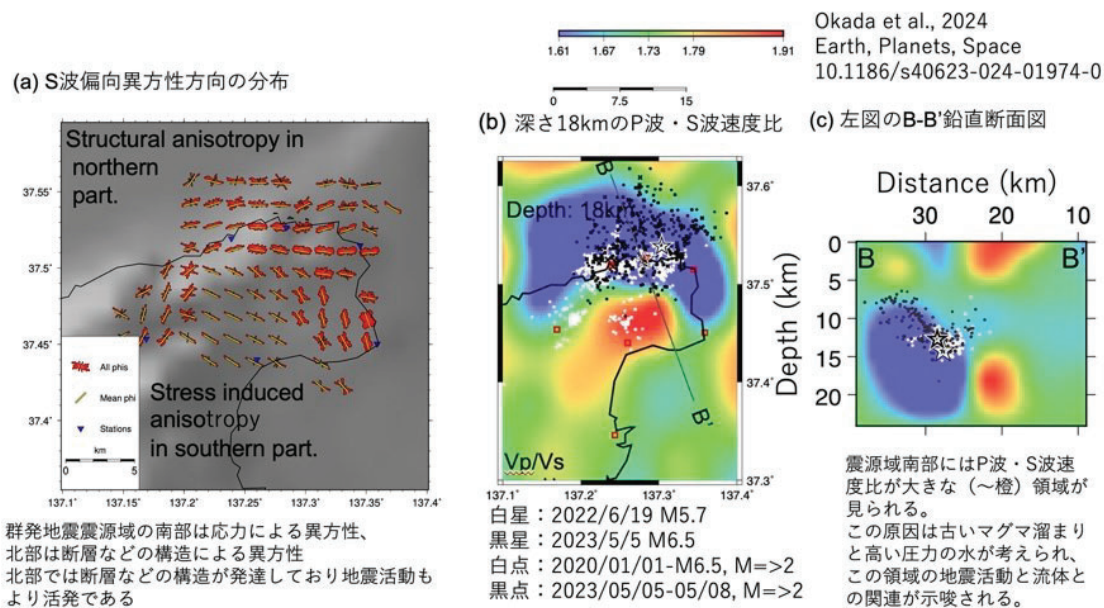


図-3 (a) 能登半島群発地震震源域におけるS波偏向異方性方向。(b) 深さ18kmにおけるVp/Vs構造 (c) B-B'断面図。Okada et al. (2024)より引用。

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し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Mj6.5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Mj6.5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Mj6.5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。Mj6.5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1 km～5 km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 ($M_j \geq 1.0$) 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。 $M_j 6.5$ 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ほど浅く求まれ、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 V_p/V_s が高く、 V_p 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

令和6年能登半島地震の海域緊急余震観測を、自由落下自己浮上式海底地震計(OBS)を用いて実施している。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 $M_j 1.7$ 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 (Reasenber 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

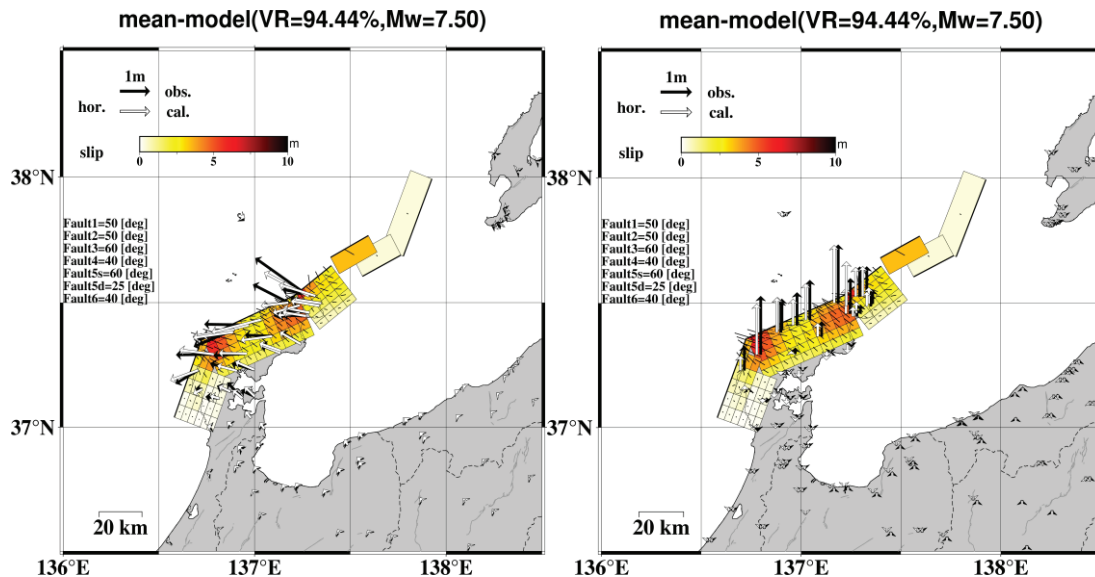


図-4 稠密測地観測データにもとづいて推定された2024年能登半島地震(M7.6)の地震時すべり分布。(左) 推定されたすべり分布とGNSSの水平成分の観測値(黒矢印)と計算値(白矢印)の比較。(右) 推定されたすべり分布とGNSSの上下成分の観測値(黒矢印)と計算値(白矢印)の比較。

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ズ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ロ法(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-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

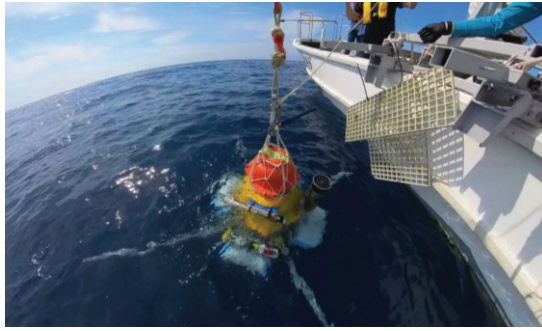


写真-1 海底電位差磁力計（OBEM）の投入（2023年8月）の様子。

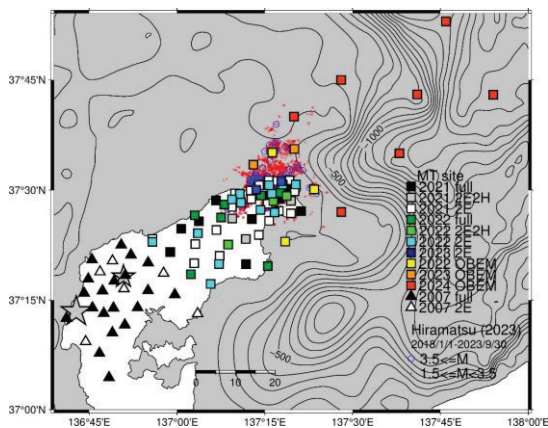


図-5 2023年度末までの能登半島での陸域・海域のMT観測点分布。

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駿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、 SO_4^{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、 $\delta^{18}\text{O}$ 値、 δD 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 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は2022年から2023年7月にかけて2.9 Ra（1 Ra: 大気の $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 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變成岩の上に、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、富山県白中地域）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、基盤となる變成岩）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）による隆起量調査

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縹地区と川浦地区にて掘削調査を実施した。馬縹地区の標高約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、輪島市町野町曾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という結果を得た。

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 12 km) 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 3 km 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 $M_w7.3$ 程度の地震が連動して発生することで、全体として $M_w7.5$ 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 $= ((D4 \sim D6) + D3/2) / \text{総数}$) 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、宝立町鶴飼地区、輪島市河井地区、鳳至地区、門前町走出・館地区、門前町道下地区、門前町黒島地区、穴水町大町地区) 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。

内等で液状化が発生したとの報告があるが、図中に

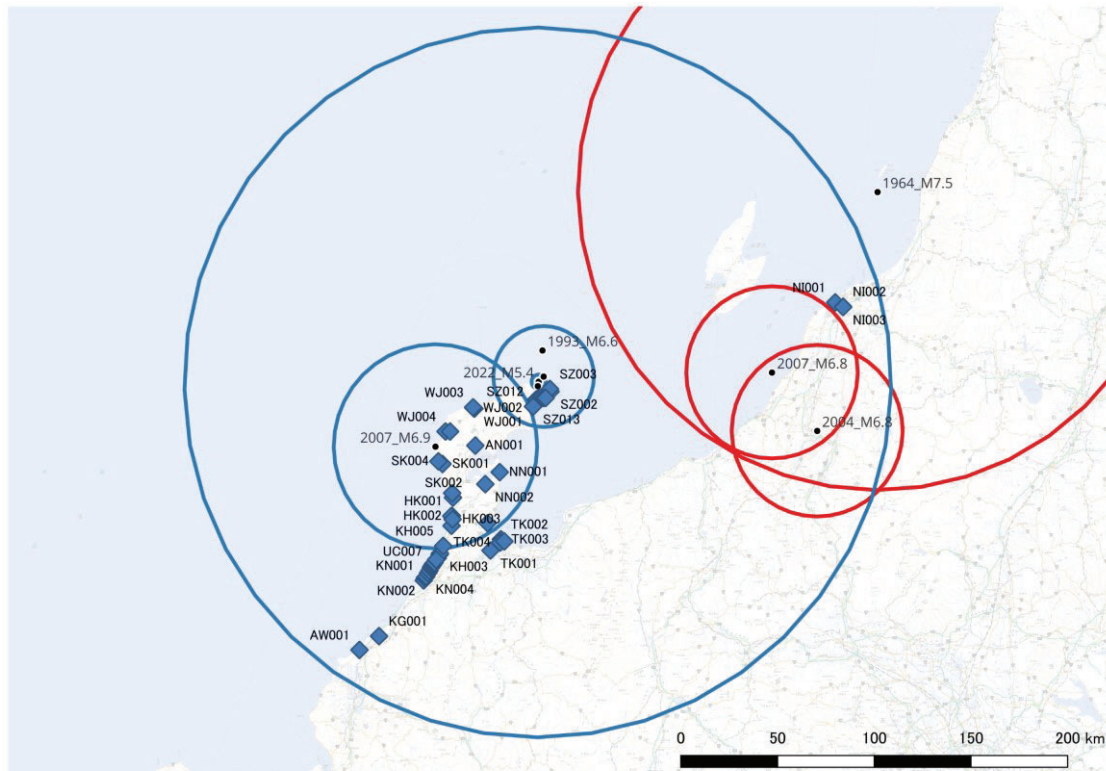


図-6 2024年M7.6地震による液状化発生確認地点および液状化限界震央距離

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 $\log_{10} R = 0.77M - 3.6$ （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 $R \approx 178.6$ [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

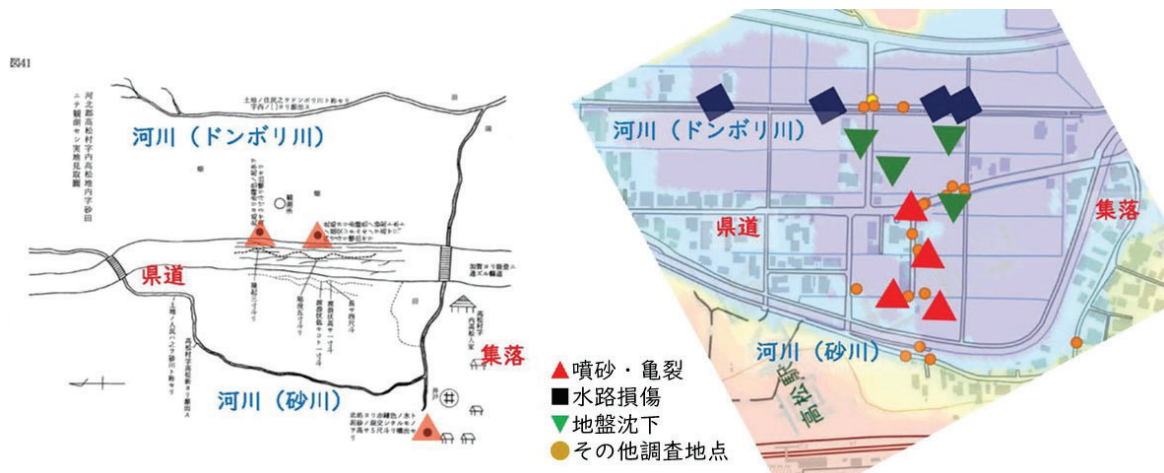


図-7 かほく市内高松における濃尾地震(1891)と能登半島地震(2024)の液状化発生状況

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挙げる。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):金沢市栗崎、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(松ヶ下港)、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に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律ではなく、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広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ソーリズムの提案. 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 nonlinear inversion technique. *Phys Earth Planet Int* 47, 50-61. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(87\)90066-5](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/202307031300higaihou.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/higaihou_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.
- Reasenbergs P.A., and Oppenheimer D. (1985): FPFIT, FPLOT 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/image242/047.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

—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

2023年2月6日にトルコ南部で、マグニチュード7.8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。

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、地殻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6 mの左横ずれ運動を示す。この変位不連続は、主にÇardak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。

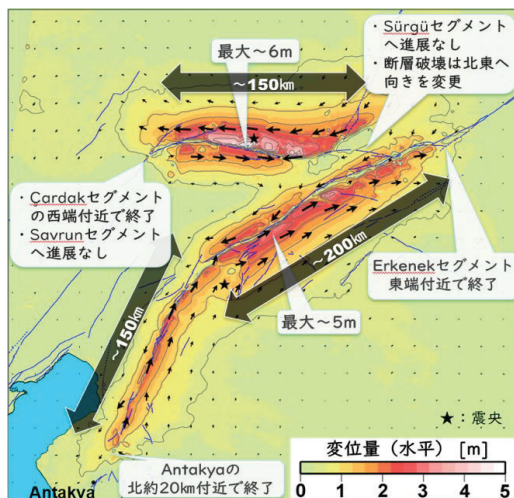


図-1 SARにより捉えられた地殻変動分布図（水平成分）。等値線は0.5m間隔。青線は活断層を示す（Emre et al., 2013）

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（ ΔCFF ）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 ΔCFF が正值となり、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 ΔCFF の正值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。

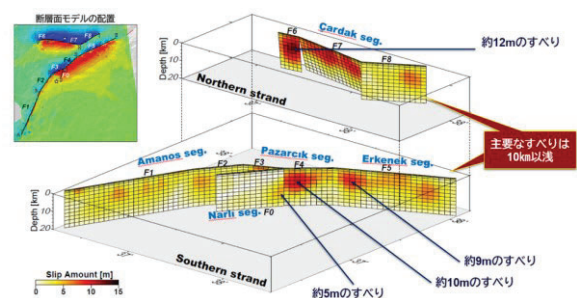


図-2 SARにより捉えられた地殻変動から推定したすべり分布モデル

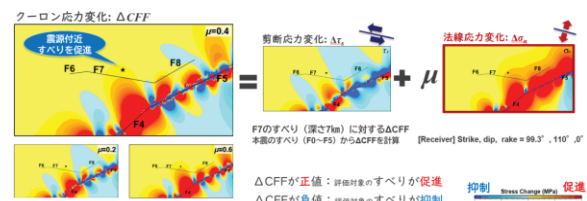


図-3 最初の地震がÇardakセグメント（F7）上の左横ずれ成分に対して与える静的応力変化

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， M_w 1.0—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。

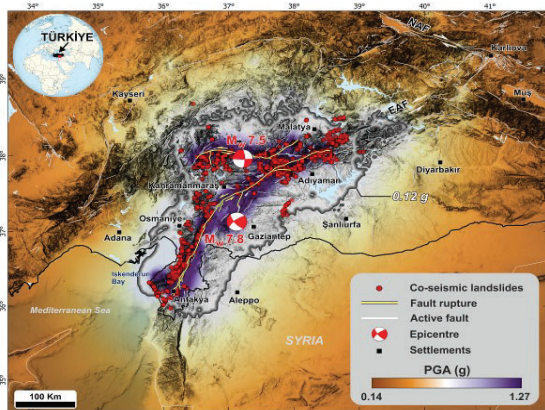


図-4 地震により発生した斜面災害分布図

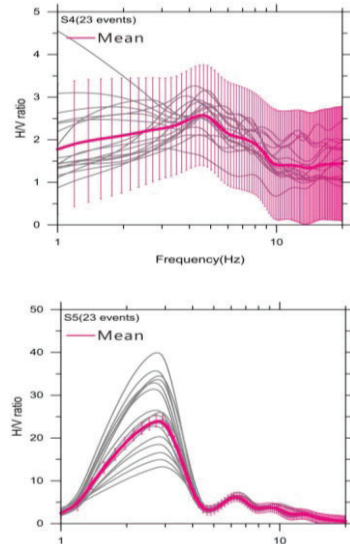


図-5 Incirlic 地区で発生した大規模地すべり地内外の卓越振動数解析結果。(a):地すべり移動土塊における観測結果；(b) 地すべり地外の山地斜面における観測結果

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，深層学習量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)。

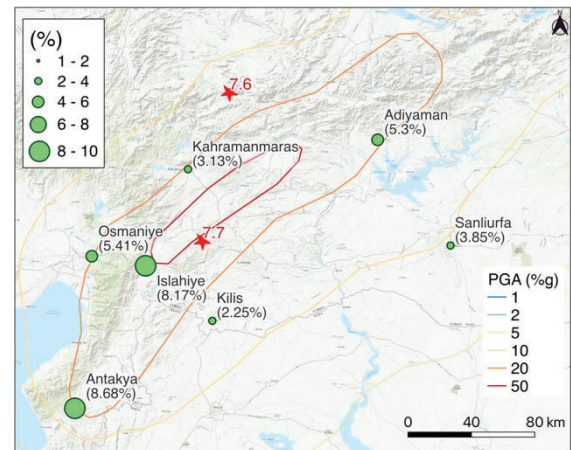


図-6 トルコ・シリア地震後の建物被害率の分布

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) に基づく地殻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。

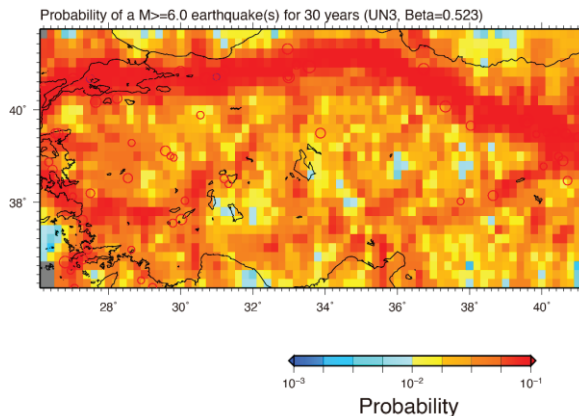


図-7 測地データ(Weiss et al., 2020)に基づく歪速度から計算した地震発生確率(30年間、Mw6以上)

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、 9.6×10^{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20 km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に近い値を有するが、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まう。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80 km程度であり、地震モーメントは 3.2×10^{20} 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。

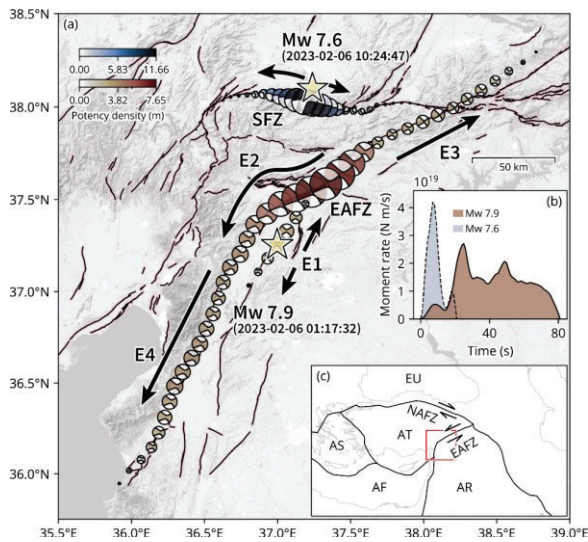


図-8 Mw 7.9 Nurdağı-Pazarcık地震とMw 7.6 Ekinözü地震のポテンシー密度テンソルインバージョンの解析結果（図は奥脇氏提供）。

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

の大き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) を用いて地殻浅部の異方性構造 (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。

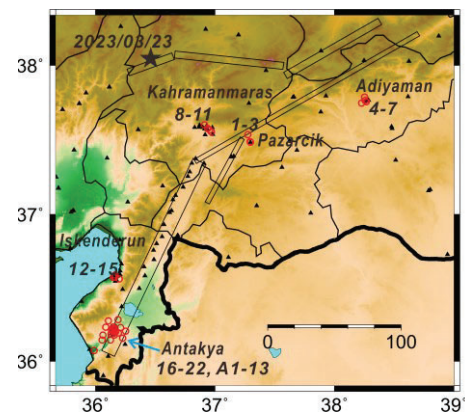


図-9 強震観測点の位置

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、被害が激しい地域にある。

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、アンタキヤ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。本システムによって 1 g 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。

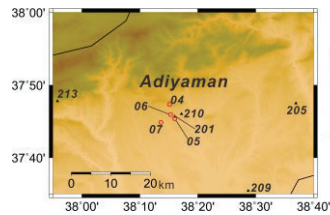


図-10 アディヤマン中心部の強震観測点 (4 : 基準点)

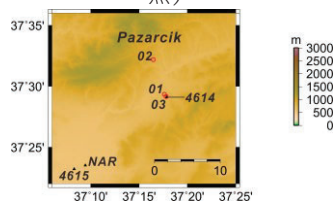


図-11 パザルジック地域の強震観測点 (2 : 基準点)

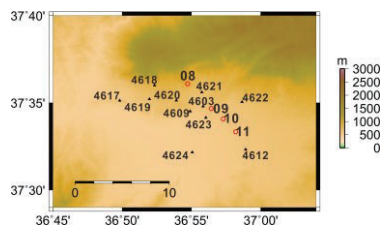


図-12 カフラマンマラッシュ中心部の強震観測点 (8 : 基準点)

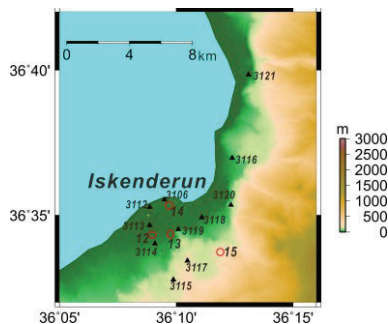


図-13 イスケンデルン地域の強震観測点 (15 : 基準点)

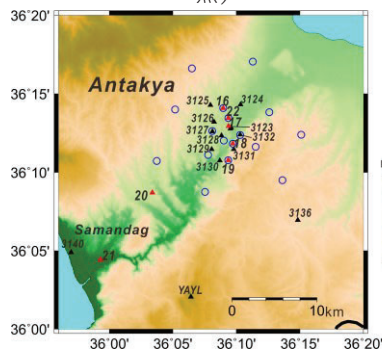


図-14 アンタキヤ地域の強震観測点 (19 : 基準点)

(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 日 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。

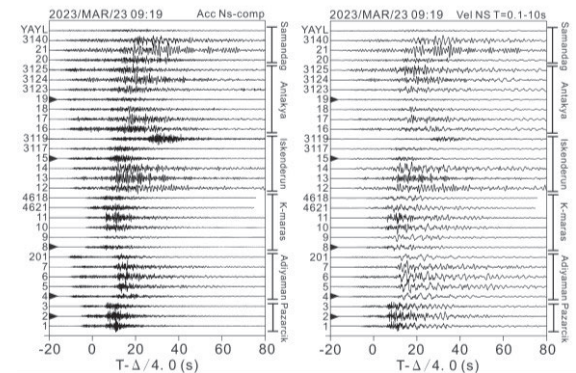


図-15 2023年3月23日9時19分の地震による加速度記録 (左) と周期1～10秒の速度記録 (右)

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ヤ地域の被災地域で 0.2～2Hz の周波数帯域でスペクトル比が大きい。また、サマンドーでは、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。

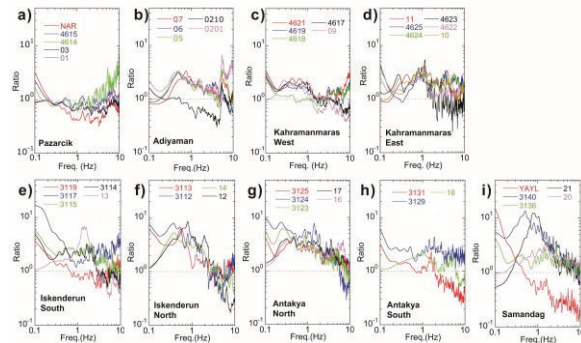


図-16 基準点に対するすべての地震記録の水平成分の平均スペクトル比

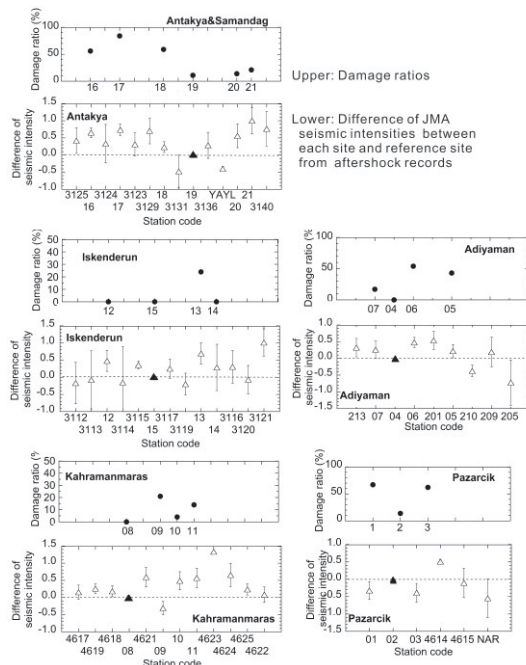


図-17 計測震度の差と被害率の関係

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

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。

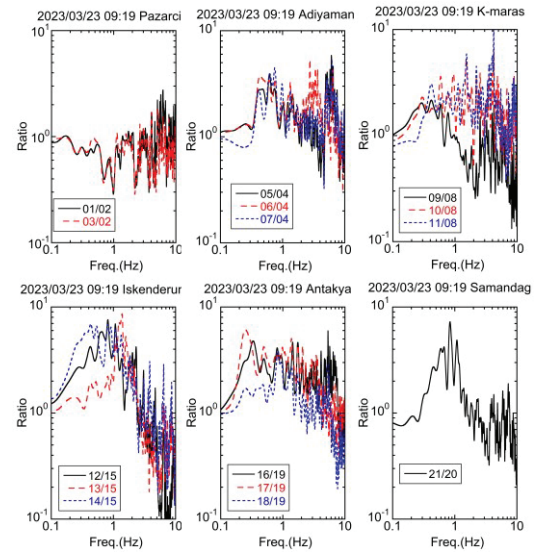


図-18の地震記録の水平成分のスペクトル比

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 1 km 程度の範囲について、地震発生前後の Pleiades 画像を収集した。

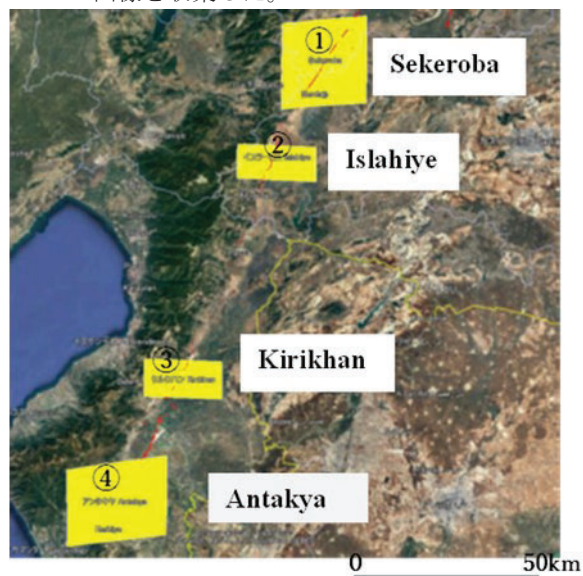


図-20 画像収集したPleiades撮影範囲(黄色)

(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。

表-1 建物被害の判読基準

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みると、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 の建物は無い。

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みると、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 の建物は無い。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	Sekeroba地区		Islahiye地区		Kirikhan地区		Antakya地区	
	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%

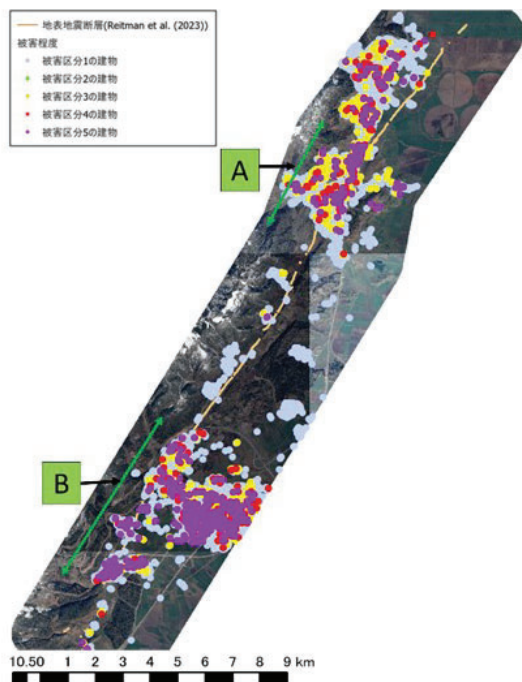


図-21 Sekeroba地区判読結果

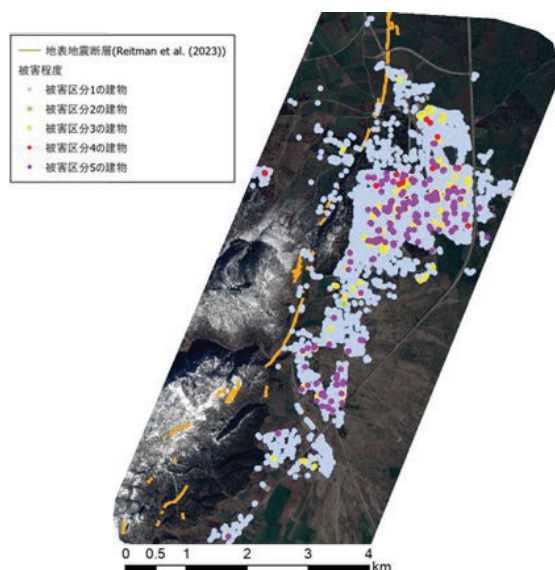


図-22 Islahiye地区判読結果

(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、Islahiye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。

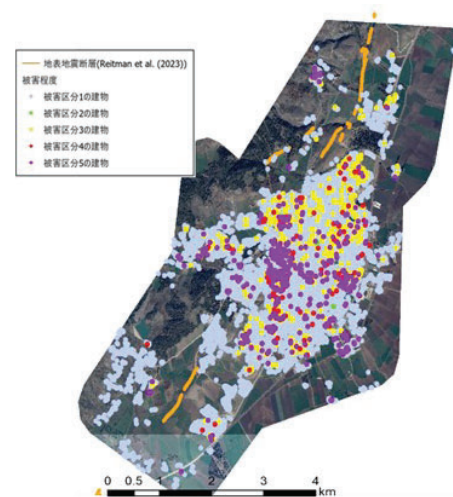


図-23 Kirikhan地区判読結果

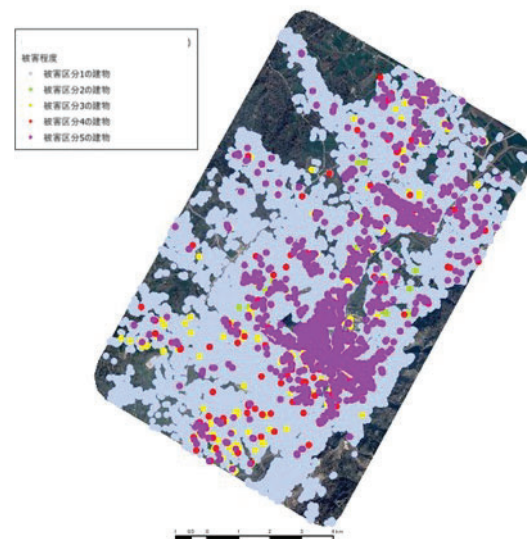


図-24 Antakya地区判読結果

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、鋼構建造物、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階の柱脚に配筋が多い。さらに、脚部に主筋が重ね継ぎ手されているため、主筋の空気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つた。2018 年以降の建物では、全体崩壊形を形成したものの単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。

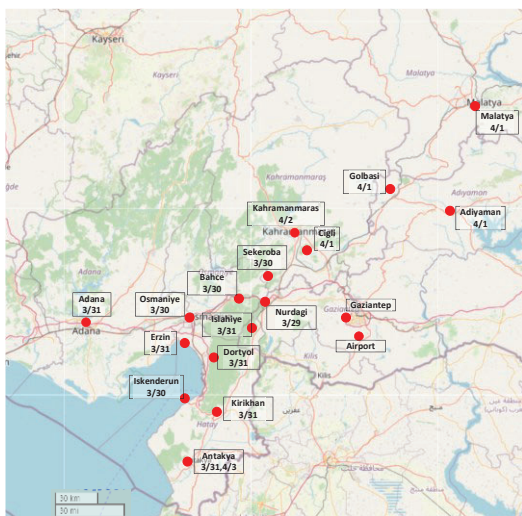


図-25 調査対象都市



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）

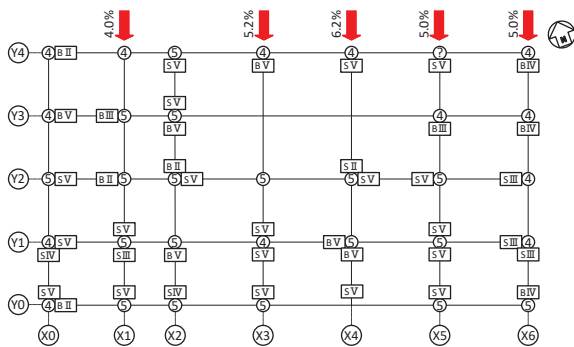


図-26 被災度判定結果（○は柱の被災度で曲げ、□は梁の被災度で B: 曲げ、S: せん断）

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には何か。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 V_s 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 V_s は150 m/sec以下であったが、GL-10m程度まで徐々に増加して190 m/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

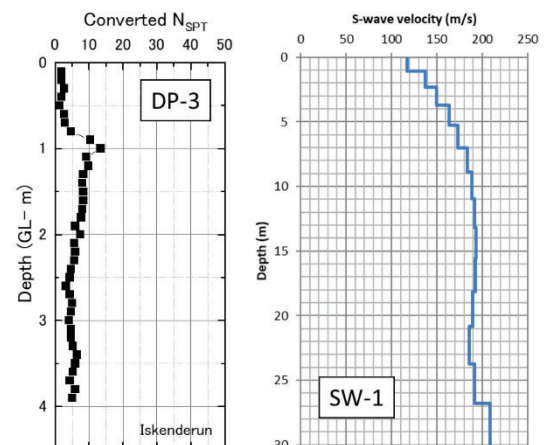


図-29 簡易動的コーン貫入試験と表面波探査結果 (Iskenderun)

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、 V_s 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。

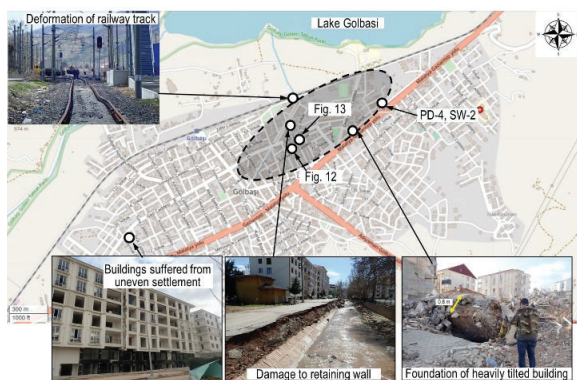


図-30 Golbasi で生じた液状化被害と分布



図-31 大きく傾斜した構造物（手前の白い建物）

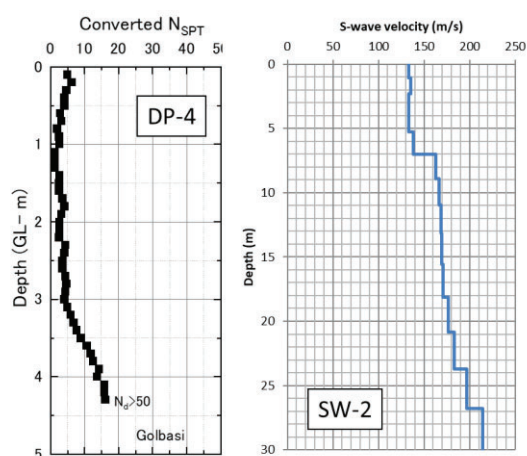


図-32 簡易動的コーン貫入試験と表面波探査結果 (Golbasi)

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。

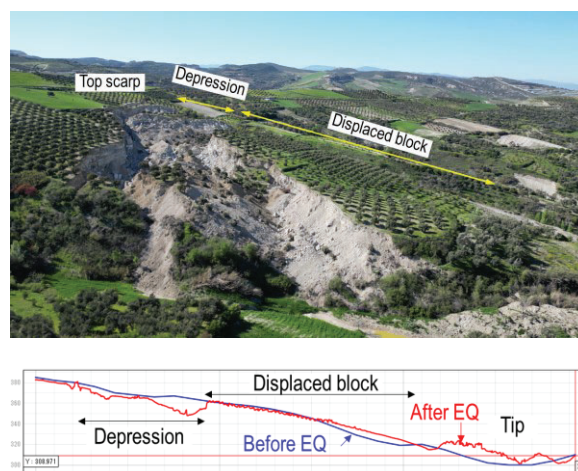


写真-6 Tepehan地すべりとUAV測量による主側線の地震前後の地表面標高

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

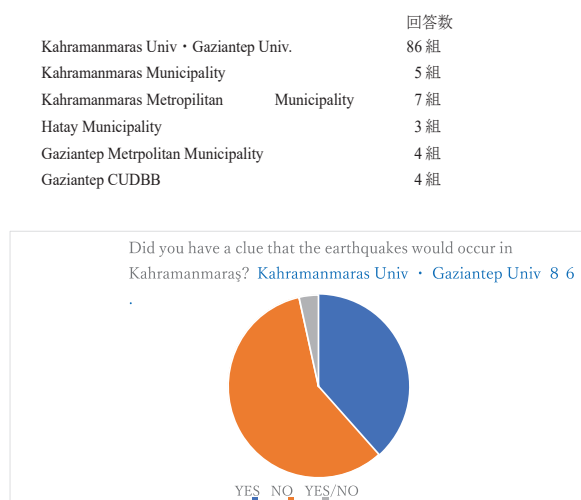


図-32 地震が起これら思っていたか（大学生）

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）。

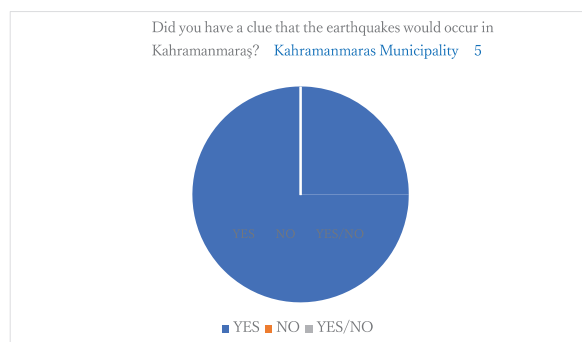


図-33 地震が起これら思っていたか（市役所）

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。行政に比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がある。

「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靱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., Portuguese, 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 Kepekçi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 ($M_j 6.5$) 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

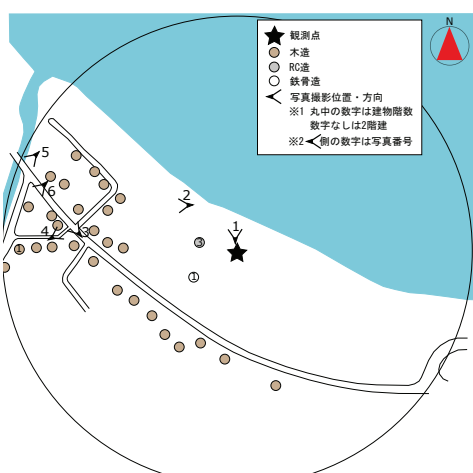


図2 K-NET 大谷周辺の建物分布



写真1 K-NET 大谷



写真2 調査範囲北側の海



写真3 周辺の様子



写真4 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。

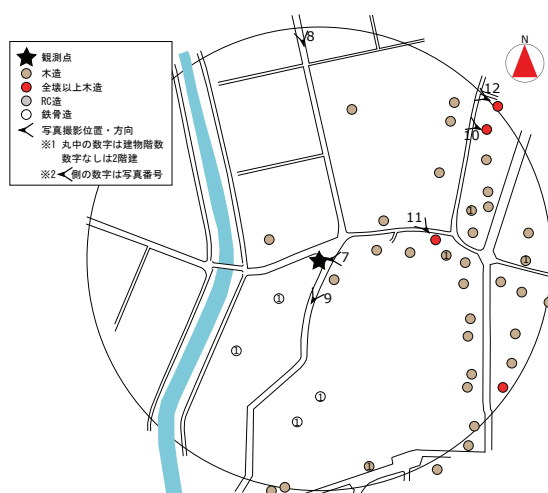


図3 K-NET 正院周辺の建物分布



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

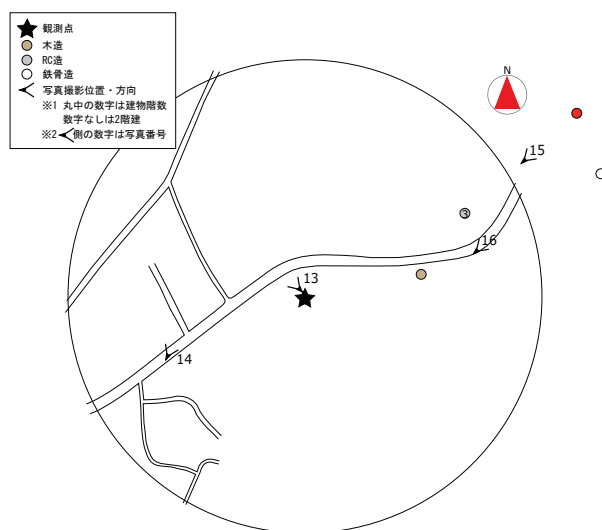


図 4 KiK-net 内浦周辺の建物分布

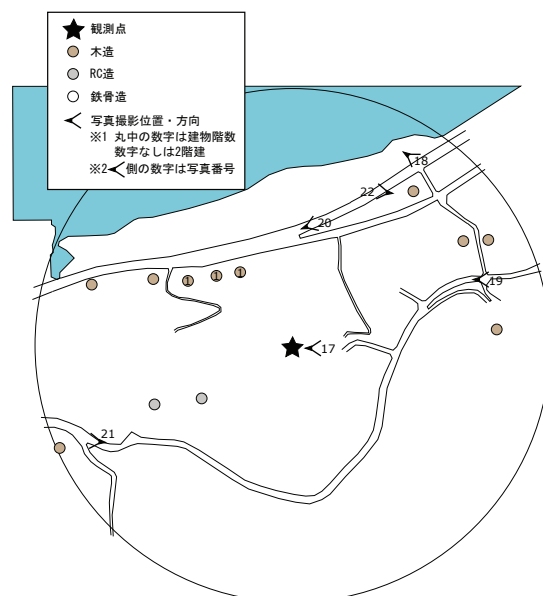


図 5 KiK-net 珠洲周辺の建物分布



写真 13 KiK-net 内浦



写真 14 周辺の様子



写真 19 周辺の様子



写真 20 周辺の様子



写真 15 周辺の様子
(能登町立松波中学校)



写真 16 瓦屋根の被害



写真 21 周辺の様子



写真 22 瓦屋根の被害

(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。

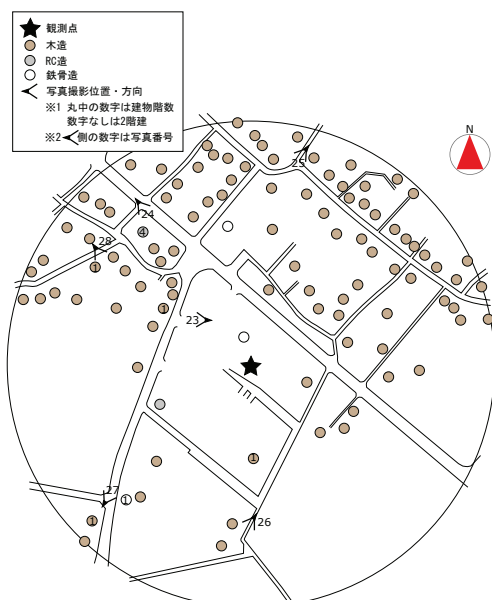


図6 能登町松波震度計周辺の建物分布



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

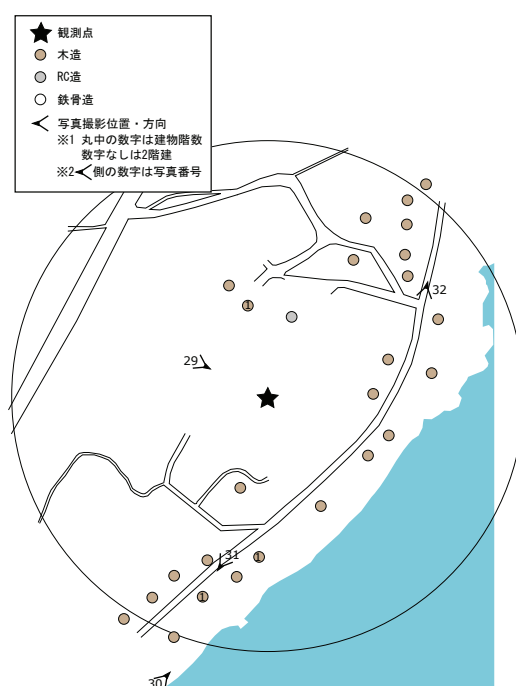


図7 JMA 珠洲市三崎町周辺の建物分布

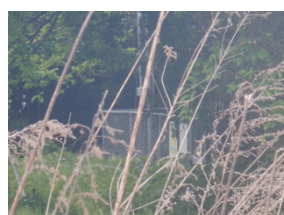


写真29 JMA 珠洲市三崎町



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

地震名	観測点名	震度	建物棟数		全壊・大破棟数		全壊・大破率 [%]	木造全壊率 [%]	地震動強さ				
			全体	木造	全体	木造			PGA ^{*1} [cm/s ²]	PGV ^{*2} [cm/s]	計測震度	1-2秒震度	1-1.5秒震度
2023年 石川県能登半島沖 の地震	K-NET大谷	6弱	30	28	0	0	(0.0)	(0.0)	530.9	42.3	5.5	5.09	5.15
	K-NET正院	6強	42	38	4	4	(9.5)	(10.5)	650.8	100.7	6.1	6.10	6.10
	KiK-net内浦	6弱	2	1	0	0	(0.0)	(0.0)	539.3	25.4	5.5	4.57	4.62
	KiK-net珠洲	6弱	12	10	0	0	(0.0)	(0.0)	606.5	59.4	5.9	5.33	5.32
	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
過去の記録	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
	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

※1 地動最大加速度（水平2方向ベクトル合成）

※2 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）

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/s²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JMA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

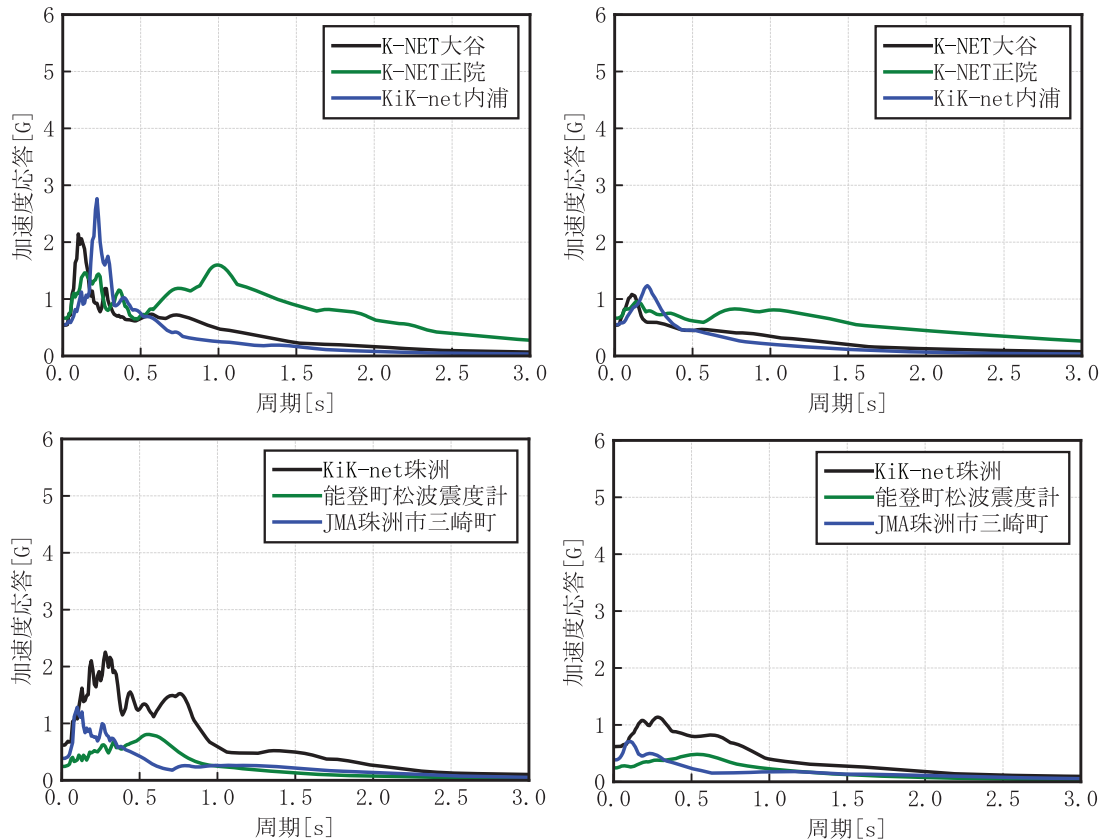
日本建築学会（1980）：1978年宮城県沖地震災害調査報告, 日本建築学会, 908p

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ー建物の大きな

被害をより正確に推定する地震動強さ指標ー, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第683号, pp.35-40.

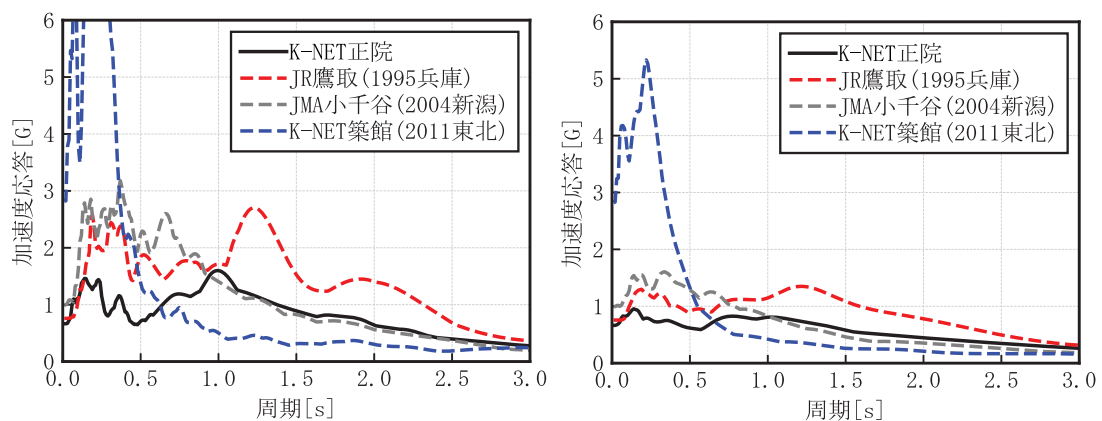
境有紀・神野達夫・瀧瀬一起（2002）：建物被害と人体感覚を考慮した震度算定方法の提案、第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.17-22



(a)減衰定数 5%

(b)減衰定数 20%

図 8 加速度応答スペクトル



(a)減衰定数 5%

(b)減衰定数 20%

図 9 加速度応答スペクトルの過去の記録との比較

リビアのDerna (El-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 Quarloti*****

*

* 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。

Wadi Derna Flood

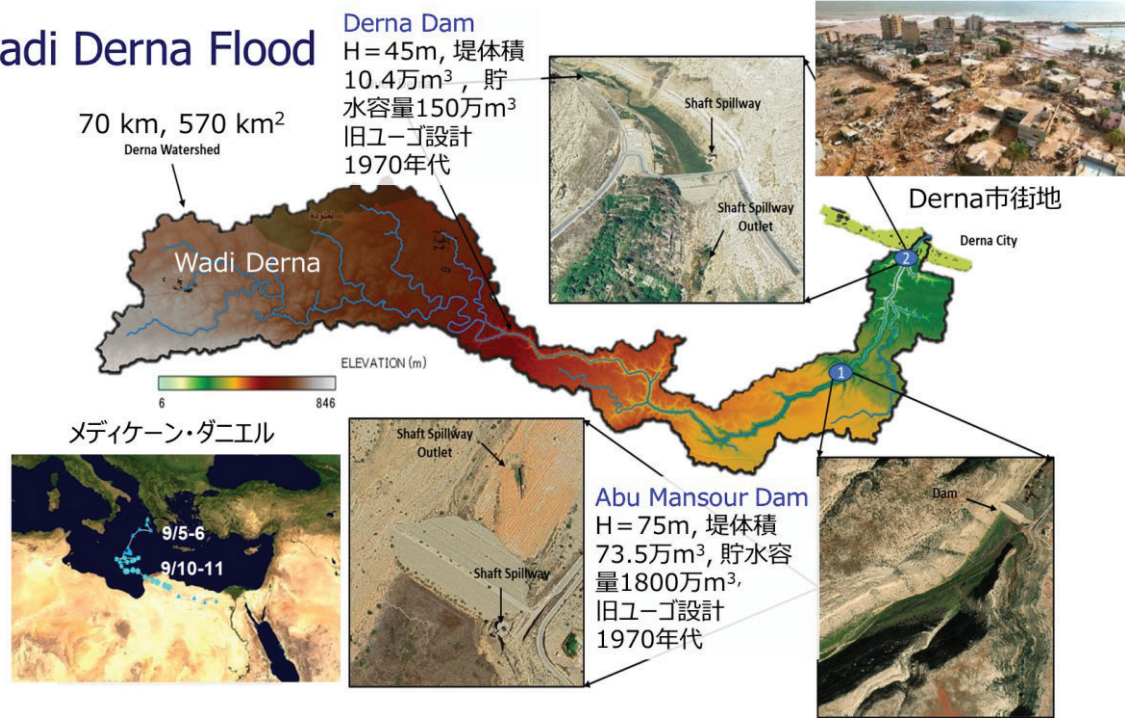


図1 デルナ流域と2つのダム（Abu Mansour（上流）、Derna（下流）dam）

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。

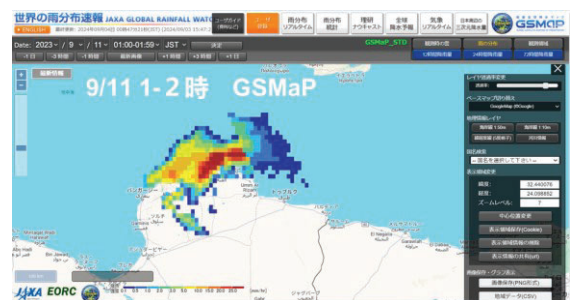


図2 9/11のGSMaPの降雨観測状況（JAXA）

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 m^3)と下流のDerna (EL Bilad) ダム(115万 m^3)であり、これを単純に上流と中流の流域面積485 km^2 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6 km^2 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拔約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 m^3/s 、下流のDernaダムが、直径6mで放流能力が350 m^3/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840 m^3/s 、洪水流入水量1400万 m^3 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170 m^3/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350 m^3/s 、洪水流入水量400万 m^3 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350 m^3/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2,000 m^3/s 以上、洪水流入水量8,000万 m^3 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。

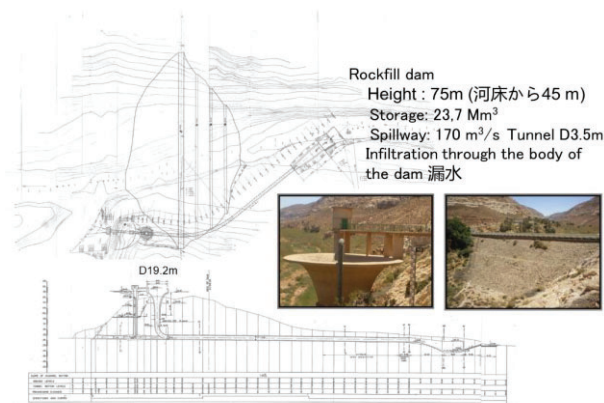


図3 Abu Mansourダムの構造図と決壊前の写真



写真1 Abu Mansourダム（決壊後）から上流を望む

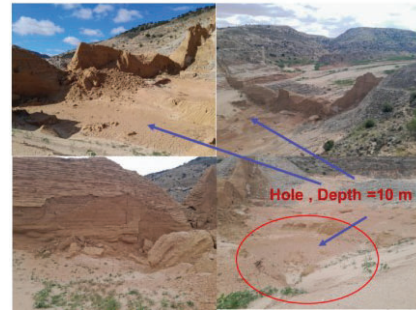


写真2 Abu Mansourダム（決壊後）と河床状況

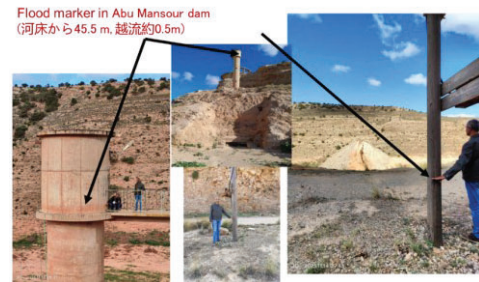


写真3 Abu Mansourダム（決壊後）の越流状況

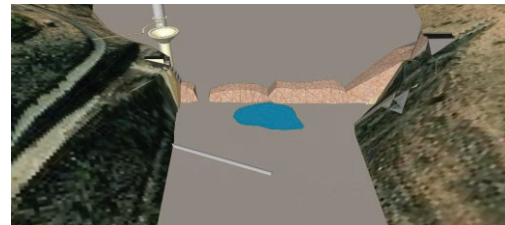


図4 Abu Mansourダム（決壊後）付近の模式図

(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。

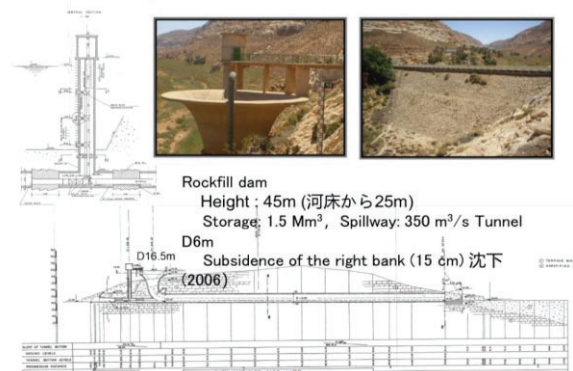


図5 Dernaダムの構造図と決壊前の写真



写真4 Dernaダム（決壊後）と河床状況

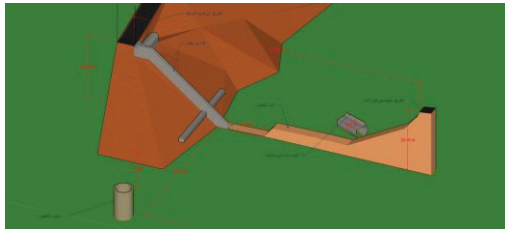


図6 Dernaダム（決壊後）付近の模式図

(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靱な構造設計（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

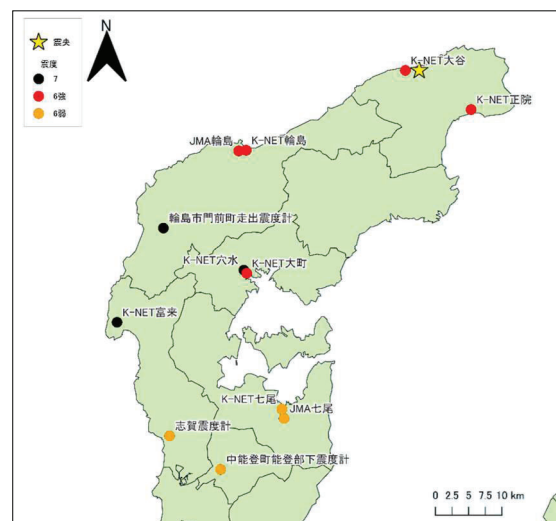


図1 対象とした観測点の位置

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○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、○印の位置が半径200m円内の若干外側になることもある。○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

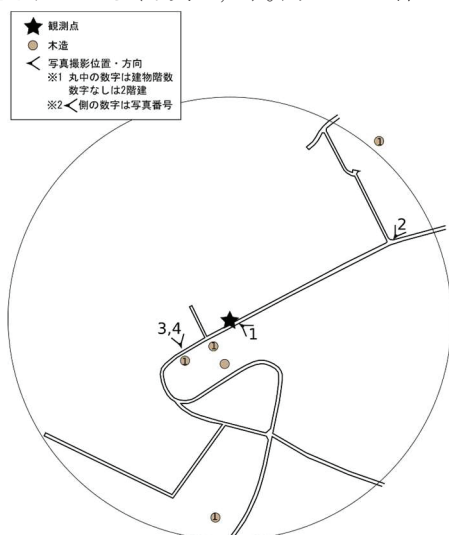


図2 K-NET 富来周辺の建物分布



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

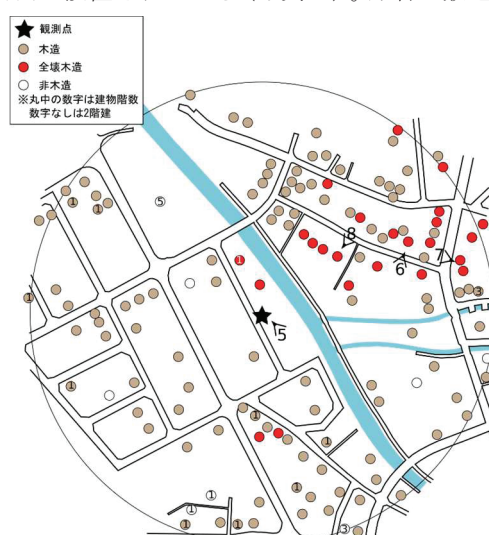


図3 K-NET 穴水周辺の建物分布



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)

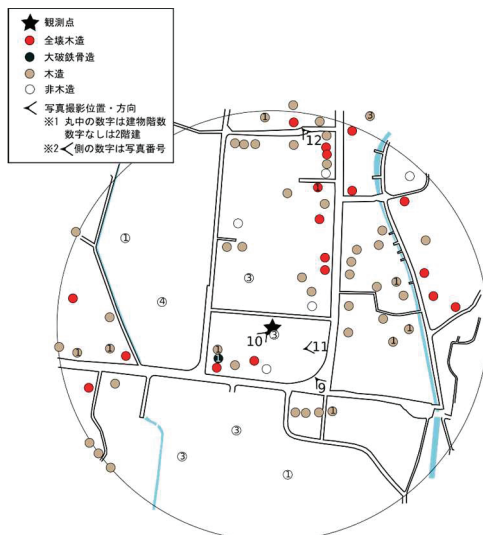


図 4 輪島市門前町走出震度計
周辺の建物分布

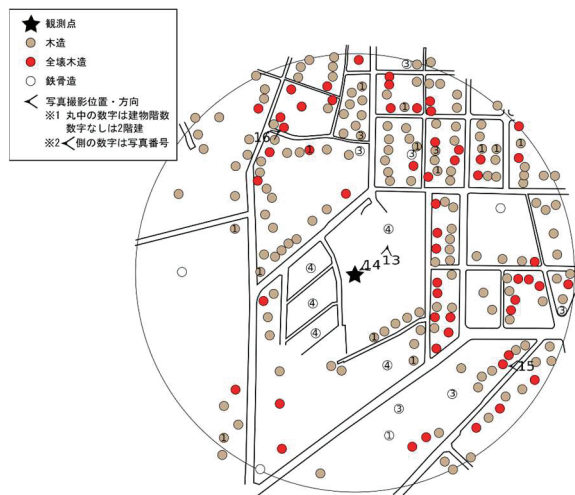


図 5 JMA 輪島周辺の建物分布



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 13 輪島地方合同庁舎



写真 14 JMA 輪島



写真 11 地盤被害



写真 12 全壊木造



写真 15 全壊木造



写真 16 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。

(7) K-NET大谷(震度6強, 調査日: 1/26)

観測点は珠州市立大谷小中学校(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

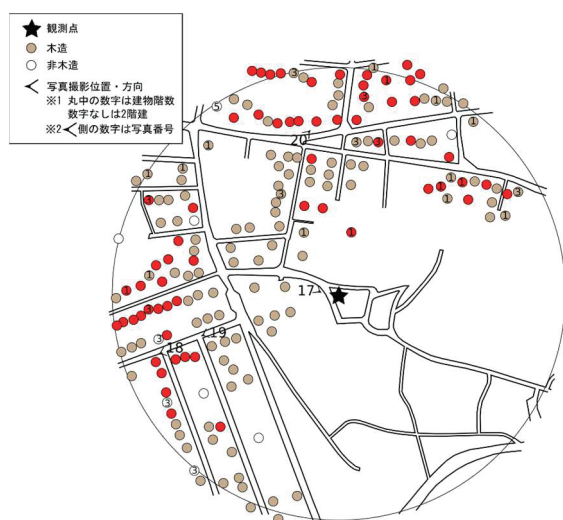


図6 K-NET 輪島周辺の建物分布

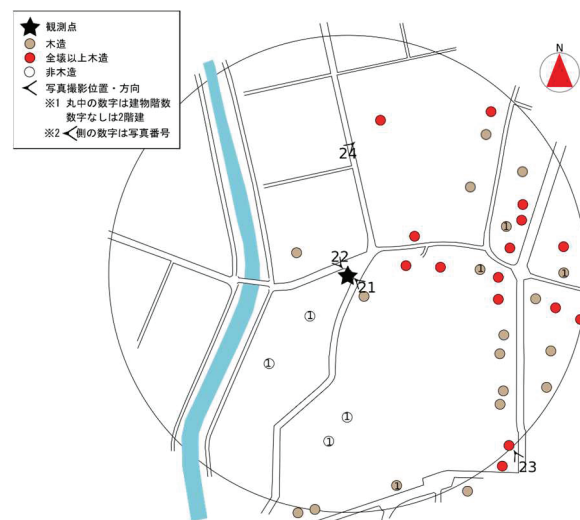


図7 K-NET 正院周辺の建物分布



写真17 K-NET 輪島



写真18 全壊木造



写真21 K-NET 正院



写真22 観測点近傍の段差



写真19 全壊した木造建物



写真20 全壊木造



写真23 全壊木造



写真24 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/s^2 を超える記録が複数あり、特にK-NET富来では 2750cm/s^2 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 $1G=9.8\text{m/s}^2$ 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害

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

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

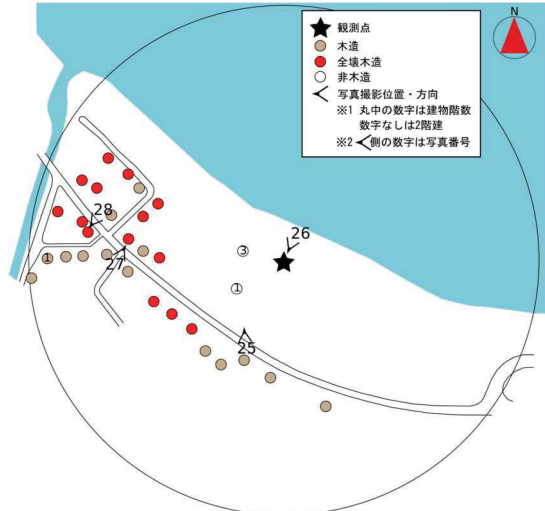


図8 K-NET 大谷周辺の建物分布



写真 25 珠州市立大谷
小中学校



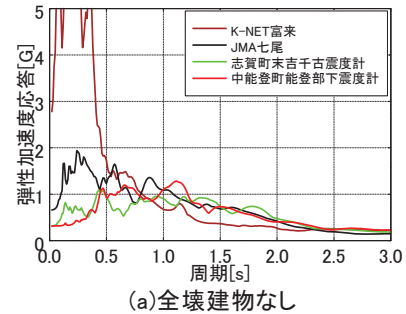
写真 26 K-NET 大谷



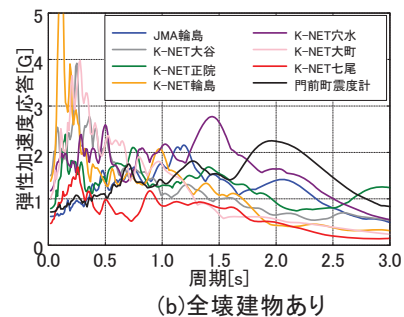
写真 27 全壊木造



写真 28 全壊木造



(a)全壊建物なし



(b)全壊建物あり

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)

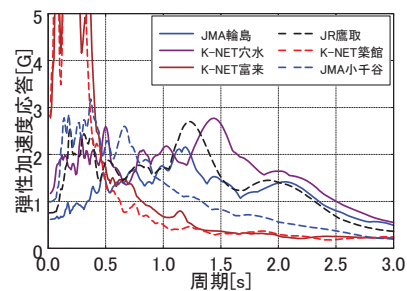


図10 過去の強震記録との比較

表1 観測点周辺の被害状況と地震動強さ指標

	観測点名	震度	建物棟数		全壊・大破棟数		全壊・大破率[%]	木造全壊率[%]	地震動強さ				
			全体	木造	全体	木造			PGA [cm/s ²]	PGV [cm/s]	計測 震度	1-2秒 震度	1-1.5秒 震度
2024年 能登半島地震	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
	K-NET輪島	6強	180	171	62	62	34.4	36.3	1627.6	88.7	6.2	5.99	6.02
	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
過去の記録	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
	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	5.38	5.35
	2016年熊本地震・KIK-net益城	7	225	223	14	14	6.2	6.3	1313.8	131.6	6.5	6.38	6.48

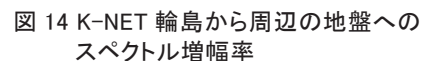
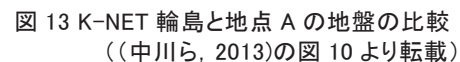
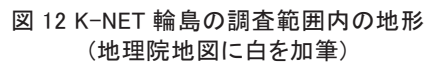
※1 建物棟数が少ない(80棟以下)観測点の被害率は参考値として括弧つきで示す。※2 JR鷹取の被害率は全壊・大破棟数/建物棟数で求めた被害率に文献1)3)の補正を行った値。
※3 JR鷹取以外の計測震度は気象庁、防災科学技術研究所より引用計測震度は気象庁、防災科学技術研究所より引用

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高周期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



市のK-NET正院，K-NET大谷では特に差が大きい。

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



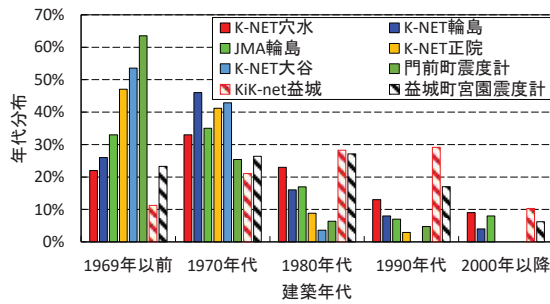


図 15 建築年代分布

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力の検証

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

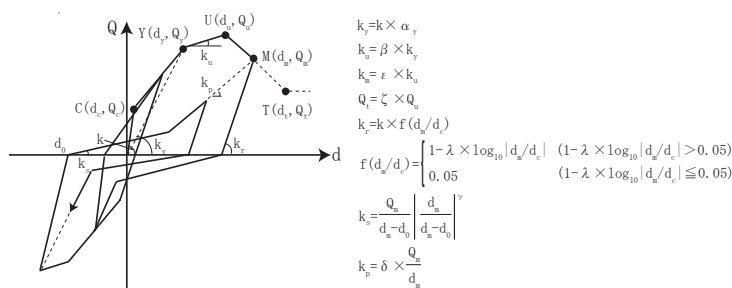


図 17 修正 Takeda-Slip モデル（汐満ら，2018）

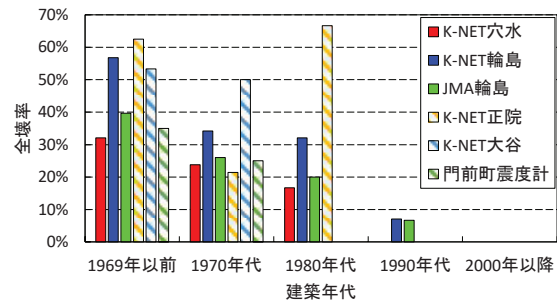


図 16 建築年代別全壊率

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 C_y 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 C_y との関係式（境・飯塚，2009）から求めた。

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

ここで、 h ：高さ[m]（=2階建てを想定した等価高さ4.5m18）， α_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 C_y 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 C_y 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 C_y 、K-NET大町は $C_y=0.2$ 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 C_y 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	$d_u[\text{rad}]$	0.025
α_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、 $C_y=0.3$ 以下で $1/15\text{rad}$ を超えており、JR鷹取のように C_y 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 C_y 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、 $C_y=0.4$ 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（ R_{max} ）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

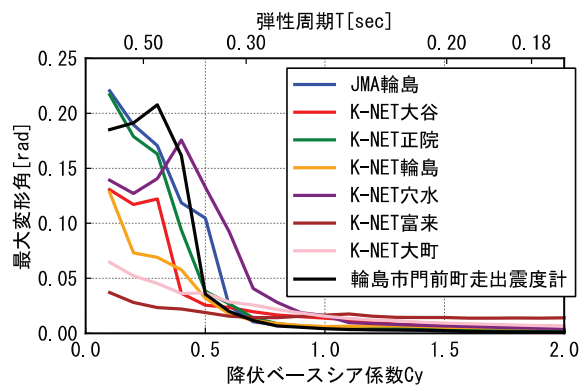


図 18 降伏ベースシア係数と最大変形角
(2024 年能登半島地震の記録)

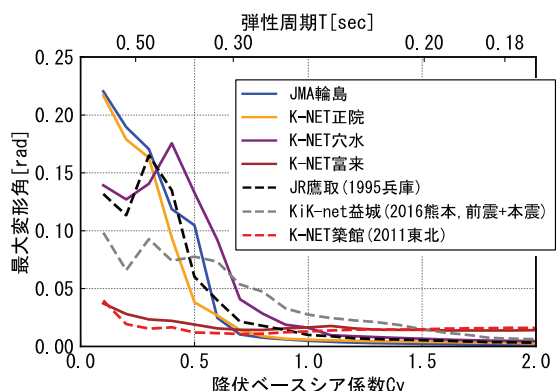


図 19 降伏ベースシア係数と最大変形角
(過去の強震記録との比較)

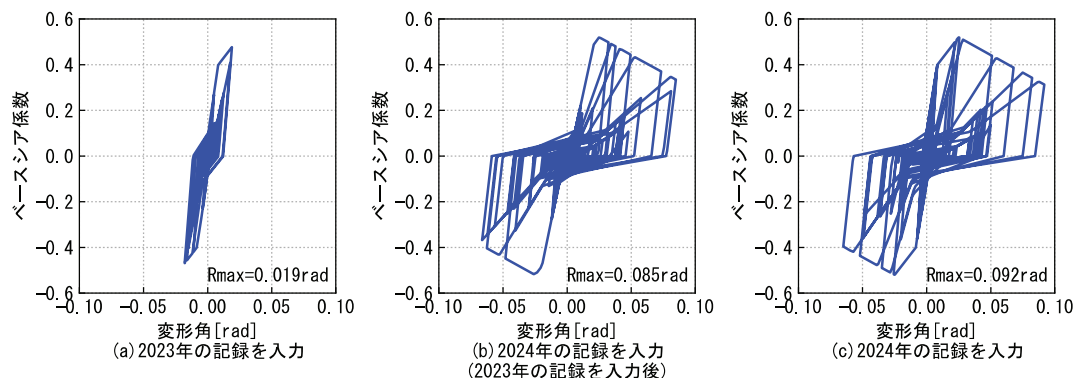


図 20 地震応答解析による荷重変位関係(入力:K-NET 正院 NS, $C_y=0.4$, 図中 R_{max} : 最大変形角)

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

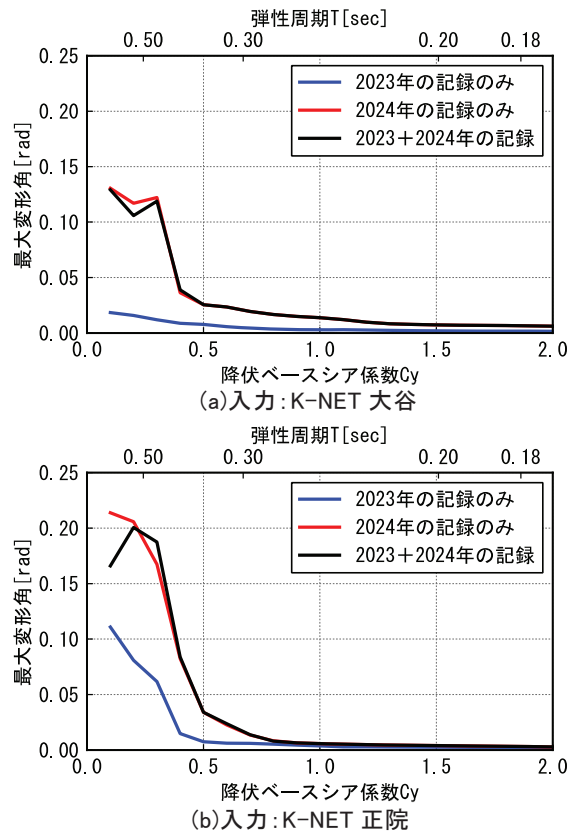


図 21 降伏ベースシア係数と最大変形角
(2023/5/5 の地震の記録を繋げて入力した場合)

震動シンポジウム, pp.60-68.

境有紀, 神野達夫, 額田一起 (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, 額瀨一起 (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事が分かった。その選択理由として現実感に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いうことであった。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、鹿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ー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 （代表者）	山口大学大学院・教授
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ではない。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。No.3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、来訪者に適宜声掛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, No.12も同様に、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

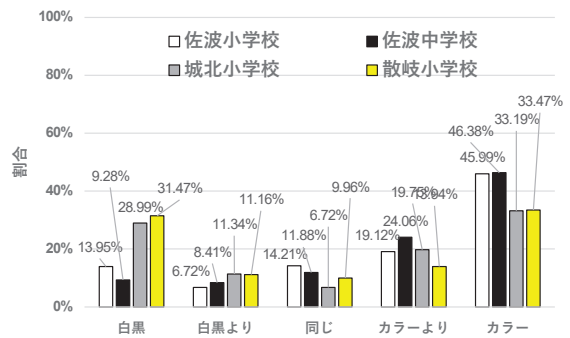


図-1 現実感の比較結果(佐波小学校 N=387, 佐波中学校 N=345, 城北小学校 N=238, 散岐小学校 N=251)

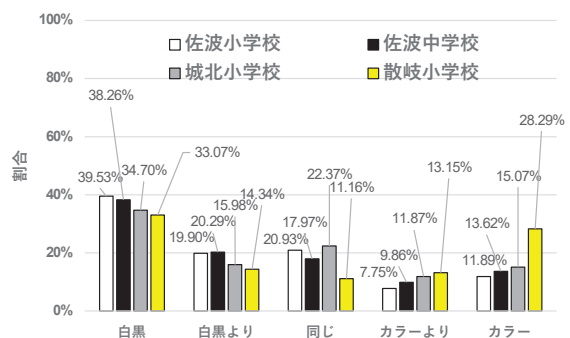


図-2 恐怖感の比較結果(佐波小学校 N=387, 佐波中学校 N=345, 城北小学校 N=219, 散岐小学校 N=251)

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る

表-3 選択理由に対する回答選択枝

現実感	カラー側回答	「カラーは現実で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怖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、佐波中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「カラーは現実で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「カラーは現実で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）、

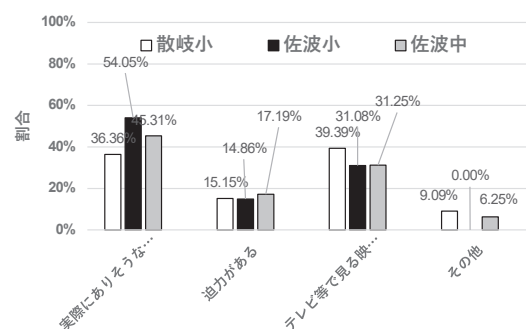


図-3 現実感のカラー側の選択理由
(散岐小 N=33, 佐波小 N=74, 佐波中 N=64)

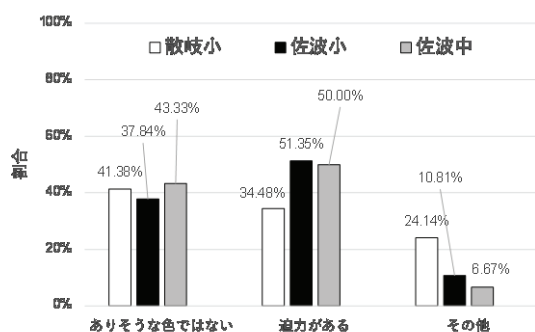


図-4 現実感の白黒側の選択理由
(散岐小 N=29, 佐波小 N=37, 佐波中 N=30)

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

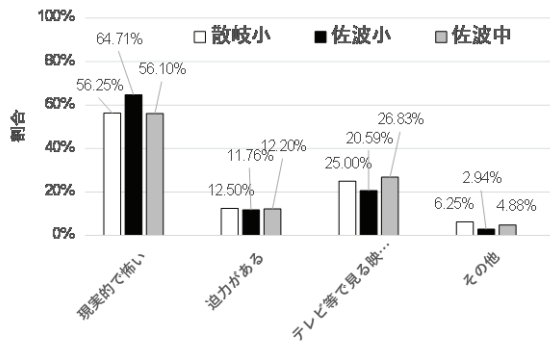


図-5 恐怖感のカラー側の選択理由
(散岐小 N=32, 佐波小 N=31, 佐波中 N=41)

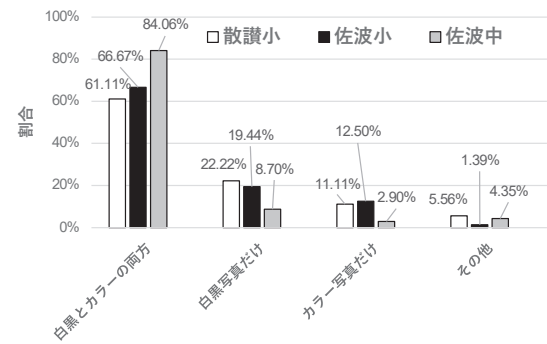


図-7 展示方法
(散岐小 N=36, 佐波小 N=72, 佐波中 N=69)

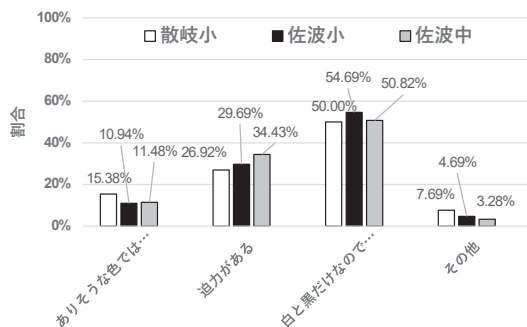


図-6 恐怖感の白黒側の選択理由
(散岐小 N=26, 佐波小 N=64, 佐波中 N=61)

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ひやすかったから(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)」。

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

る、または現実に見える方を採用したいと思う。(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れる。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する。

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、国土交通省鳥取河川国道事務所、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



(1)元画像



(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

城北小学校で使用了した写真 (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

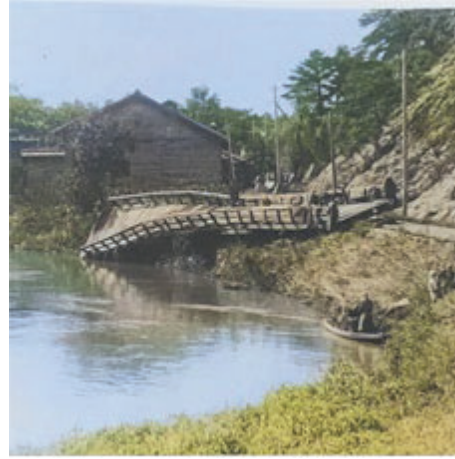


(1)元画像



(2)カラー化画像 (Photoshop)

写真-9 昭和47年 斐川町



(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



(1)元画像

(2)カラー化画像（Photoshop）

写真-11 大正元年



(1)元画像

(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）

（お問い合わせ）電話：0774－38－4347

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