

**第 60 回自然災害科学総合シンポジウム**  
**(2023 年度防災研究所 重点推進型共同研究)**

**講演論文集**

**2023 年 9 月 25 日 (月)**

**主催**

**京都大学防災研究所 自然災害研究協議会**

# 第 60 回自然災害科学総合シンポジウム

主催： 京都大学防災研究所自然災害研究協議会  
日程： 令和 5 年 9 月 25 日（月）13 時 00 分～16 時 40 分（終了予定）  
場所： きはだホール（京都大学宇治キャンパス内）および Zoom によるハイブリッド開催

## 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 中北 英一（京都大学防災研究所）

13：10～13：50

【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 4 年度報告】

「トンガ海底火山噴火とそれに伴う津波の予測と災害に関する総合調査」

佐竹 健治（東京大学地震研究所）

13：50～14：30

【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】

「能登半島北東部において継続する地震活動に関する総合調査」

平松 良浩（金沢大学）

14：30～15：10

【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】

「2023 年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査の概要」

楠 浩一（東京大学地震研究所）

15：10～15：30 休憩

15：30～16：00

【自然災害研究協議会突発災害調査報告】

「2023 年トルコ・カフラマンマラシュ地震における強震観測地点での地震動と構造物被害状況」

森 伸一郎（愛媛大学 大学院理工学研究科）

16：00～16：30

【防災研究所共同研究・地域防災実践型共同研究】

「過去の白黒災害写真とそのカラー化された写真の印象に関する比較調査」

朝位 孝二（山口大学大学院創成科学研究科）

16：30～16：40

閉会挨拶

奥村 誠（東北大学災害科学国際研究所）

## 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4年度報告】
- 「トンガ海底火山噴火とそれに伴う津波の予測と災害に関する総合調査」 …… 1  
佐竹 健治（東京大学地震研究所）
- 【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】
- 「能登半島北東部において継続する地震活動に関する総合調査」 …… 12  
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4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の概要」 …… 18  
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年トルコ・カフラマンマラシュ地震における  
強震観測地点での地震動と構造物被害状況」 …… 34  
森 伸一郎（愛媛大学 大学院理工学研究科）
- 【防災研究所共同研究・地域防災実践型共同研究】
- 「過去の白黒災害写真とそのカラー化された写真の印象に関する比較調査」 …… 44  
朝位 孝二（山口大学大学院創成科学研究科）

# トンガ海底火山噴火とそれに伴う津波の予測と災害に関する総合調査 —科学研究費特別研究促進費による突発災害調査研究令和3-4年度報告—

佐竹 健治\*・前野 深\*・西田 究\*・サッパシー アナワット\*\*・関谷 直也\*\*\*

\* 東京大学地震研究所

\*\* 東北大学災害科学国際研究所

\*\*\* 東京大学大学院情報学環総合防災情報研究センター

## 要 旨

2022年1月15日にフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山で発生した噴火に伴い、世界各地で急激な大気圧変化が観測された。日本沿岸では、津波の到達予測時刻より2~3時間早く、大気波動とほぼ同じ頃に海面変動が観測され始め、気象庁によって津波警報および注意報が発表された。今回の噴火及びそれに伴う大気波動、津波について調査するため、科研費の特別促進研究が立案された。本研究では、火山噴火現象の解明、火山性大気波動などによる津波発生・伝播メカニズムの解明、津波による我が国沿岸域への影響調査、社会的影響・社会的側面の調査の4つのテーマについて総合的な研究を実施した。

### 1. はじめに

令和4(2022)年1月15日にトンガ諸島付近のフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ火山(以下ではフンガ火山と呼ぶ)で噴火が発生、近隣の島嶼地域では降灰、津波などによる被害が発生した。この噴火に伴い、世界各地で急激な大気圧変化が観測され、日本でも噴火の約7時間後に記録された。日本沿岸では、津波の到達予測時刻より2~3時間早く、大気波動とほぼ同じ頃に津波が観測され始め、鹿児島県や岩手県で1mを超えたため、気象庁によって津波警報および注意報が発表された。

今回の噴火は稀にみる規模であったこと、噴火による大気圧変動と潮位変化が世界中で記録されたことから、科学研究費補助金・特別研究促進費(いわゆる突発災害)が交付され、火山学、地震学、超高層物理学、津波工学、災害情報学などの多岐にわたる分野の研究者が、12大学・6研究機関から研究分担者(表1)及び研究協力者として参加した。4つのテーマの主な研究内容は以下の通りである。

#### テーマ1：火山噴火現象の解明

- ・多項目観測による浅海火山爆発過程の解明
- ・火山噴火による大気波動の励起メカニズムの解明
- ・噴火シミュレーション・規模推定

#### テーマ2：火山性大気波動などによる全球規模での

#### 津波発生・伝播メカニズムの解明

- ・国内外の微気圧観測データの解析による伝播特性の解明
- ・大気波動の海面の進行に伴う先行波の発達・増幅に関する解析
- ・噴火に伴う津波発生メカニズムの解明と火山性津波の予測手法の開発

#### テーマ3：トンガ噴火性津波による我が国沿岸域への影響調査

- ・沿岸域での被害実態および生態系への影響の把握
- ・観測された津波の外力と被害との関係解明(被害関数の提案)
- ・今後の課題や対応策の整理
- ・得られた情報・知見を海外、特に小島嶼開発途上国(SIDS)などへの提言と支援

#### テーマ4：社会的影響・社会的側面の調査

- ・国内の津波警報と住民の対応の調査
- ・現地および周辺国における噴火被害の状況についての情報収集

本研究は、採択の決定と開始が年度末であったことから、令和3・4年度にわたるものとなった。昨年度の自然災害シンポジウムでは令和3年度の活動について報告したが、今回は両年度分について報告する。

表1 4つのテーマの研究分担者

|             |                  |
|-------------|------------------|
| テーマ1        |                  |
| 前野 深        | 東京大学地震研究所        |
| 山本 真行       | 高知工科大学システム工学群    |
| 鈴木 雄治郎      | 東京大学地震研究所        |
| テーマ2        |                  |
| 西田 究        | 東京大学地震研究所        |
| 綿田 辰吾       | 東京大学地震研究所)       |
| 有川 太郎       | 中央大学理工学部         |
| 田中 健路       | 広島工業大学環境学部       |
| 藤井 雄士郎      | 建築研究所国際地震工学センター  |
| 近貞 直孝       | 防災科学技術研究所        |
| 山田 真澄       | 京都大学防災研究所        |
| 柿沼 太郎       | 鹿児島大学理工学域工学系     |
| 西村 裕一       | 北海道大学大学院理学研究院    |
| 対馬 弘晃       | 気象庁気象研究所         |
| テーマ3        |                  |
| サッパシー アナワット | 東北大学災害科学国際研究所    |
| 朝位 孝二       | 山口大学大学院創成科学研究科   |
| 嶋原 良典       | 防衛大学校システム工学群     |
| 高川 智博       | 海上・港湾・航空技術研究所    |
| 佐々木 大輔      | 東北大学災害科学国際研究所    |
| 王 宇晨        | 海洋研究開発機構海域地震火山部門 |
| テーマ4        |                  |
| 関谷 直也       | 東京大学情報学環         |
| 吉本 充宏       | 山梨県富士山科学研究所      |
| 秦 康範        | 山梨大学大学院総合研究部     |
| 佐藤 翔輔       | 東北大学災害国際科学研究所    |

## 2. 火山現象の解明 (テーマ1)

### 2.1 噴出物と噴火過程

2022年1月15日に発生したフンガ火山の爆発的噴火は、成層圏を貫く巨大な噴煙を形成し、大気・海洋・電離圏に全球規模の擾乱を引き起こした(前野, 2022)。この噴火により、フンガ火山山頂部では約6 km<sup>3</sup>の物質が失われ、深さ800 m以上のカルデラが形成された(Seabrook et al., 2023)。

今回の噴火を引き起こしたマグマの蓄積・上昇・噴出過程の理解を進めるために、噴出物の岩石学的特徴について検討した。フンガ火山から南南東約60 kmに位置するトンガタブ島では、噴煙からの降下堆積物(内陸)と、海面上を浮遊し海流や津波により運搬された堆積物(沿岸)の二種類の堆積物が存在する。TGS(トンガ地質調査局)およびJICAの協力を得て現地で噴出物調査を行うとともに、代表的噴出物の岩石記載およびXRFによる全岩化学組成分析、EPMAによる鉱物・ガラス化学組成分析を行った。

分析した噴出物は、降下堆積物を構成する灰色と黒色の礫サイズの軽石、および岩塊サイズの漂着軽石である。漂着軽石は黒色で、急冷を示唆するガラス質部分が認められる場合がある。漂着軽石は2021年12月以降、2022年1月14日までの先行フェーズの噴火に由来するものと考えられる。斑晶鉱物は共通し

て両輝石、斜長石、鉄チタン酸化物である。

全岩化学組成分析の結果、降下軽石は概ねSiO<sub>2</sub>含有量57–59 wt.%の安山岩であり、2014–2015年噴火を含む過去のフンガ火山の噴出物が示す組成トレンド(Brenna et al., 2022)内に収まった(図1)。なお、降下軽石のうち灰色軽石の方がやや苦鉄質である。漂流軽石には降下軽石と同様の特徴を持つものに加えて、SiO<sub>2</sub>含有量で66 wt.%に達するもの(デイサイト)が含まれることがわかった。それぞれの噴出物について両輝石の化学組成とPutirka(2008)の地質温度計を用いて、マグマの温度を推定したところ、降下軽石と漂流軽石それぞれに対して1030–1060°C、970–990°Cと見積もられた。灰色軽石の両輝石は黒色軽石のものよりもMg#に富むこともわかったが、温度推定では明瞭な差としては現れなかった。さらに、斜長石および石基・メルト包有物の化学組成と上記で推定された温度およびWaters and Lange(2015)による含水量計を用いて、降下軽石と漂流軽石のマグマの含水量はそれぞれ2.6 wt.% (1σ = 0.6)、3.2 wt.% (1σ = 0.2)と推定された。

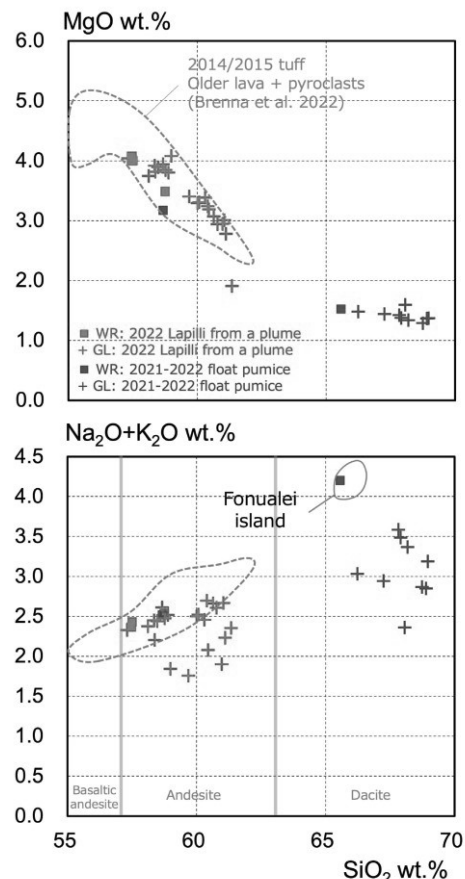


図-1 2021-2022年フンガ火山噴出物の全岩(WR)およびガラス(GL)化学組成と文献値との比較。

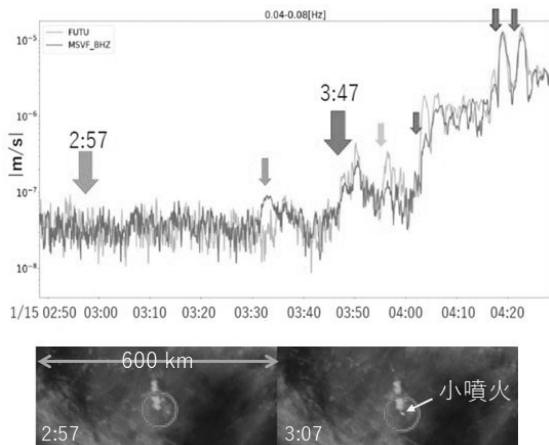


図-2 火口から約760 km 離れたフィジー (青) とウォリスフツナ (黄) の地震データ (IRIS, <https://service.iris.edu>) の振幅変化とひまわり8号赤外画像 (NICT) の画像処理結果。

以上の結果より、今回の噴火の最盛期では従来の活動によるマグマと類似の安山岩質マグマが噴出したと考えられる。島弧で一般的な珪長質マグマによるカルデラ形成噴火とは異なるタイプの噴火であったことは特筆すべき点と言える。また、噴火最盛期以前の活動の最中に、やや低温のデイサイトが噴出したことがわかった。このデイサイトと同様の岩石は、トンガ諸島ではフンガ火山の北北東約300 kmにあるフォヌアレイ火山で見出されているものの (図1)、これまでフンガ火山では報告がない。デイサイトが最盛期以前に噴出していたとすると、その起源や最盛期活動との関連は興味深く、今後さらなる検討が必要である。

## 2.2 噴火推移

すでに多様な観測データを用いて大噴火の開始過程について研究が進められており、2022年1月15日の大噴火の開始は 04:00UT ごろという結果に収束しつつある。一方、その前駆的な過程については、まだ十分に解明されていない。Borrero et al. (2023) は、現地の聞き取り調査をもとに噴火開始時間を3:47とし、Cronin et al. (IAVCEI2023) は、2:57に観測された小噴火を大規模噴火の始まりと考えた。

Ichihara et al. (JpGU2022) は、噴火口から約758 km 離れたフィジーMSVF観測点の地震計と気圧計のデータを統合解析し、大噴火前後の微細な変動を抽出してきた。堀内他 (JpGU2023) は、同程度 (752 km) の距離にあるウォリスフツナのFUTU観測点の地震計データを追加し、衛星画像のさらに詳細な観察を加えることで噴火とそれ以外の信号の切り分けを行った。その結果、二つの地震観測点で共通の振幅増

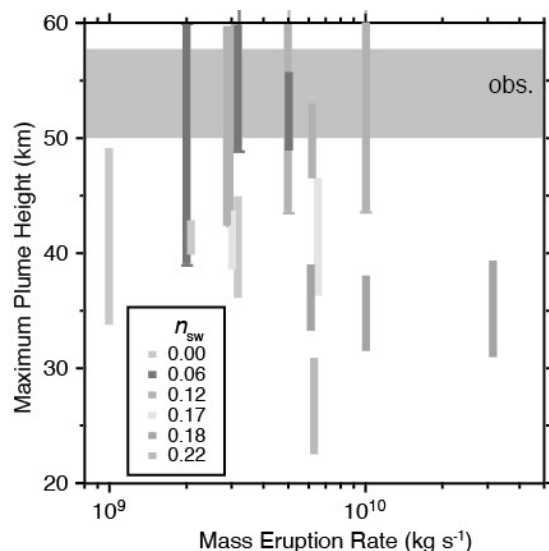


図-3 フンガ火山噴火の噴煙3次元シミュレーションから得られた噴煙最高高度。混合した海水の質量分率 $n_{sw}$ を変え、噴出率に対する噴煙高度を表す。

加が3:47頃から始まっていることを見出し、その開始時間の同時性や、より遠方の観測点で見られないことから、フンガ火山起源である可能性のあることを示した (図2)。そうだとするとその開始時刻は3:44頃である。衛星画像には、対応する表面現象が確認できないことから、これは地下または海底で発生したもので、噴火の前駆過程であると考えられる。一方、上述の2:57の小噴火に対応する地震波は確認できず、また、衛星画像解析の結果からも、この小噴火は前日から間欠的に発生していた小噴火の最後の一つとするのが妥当である。本研究成果は、上述のBorrero et al. (2023) の報告をデータから裏付ける最初の証拠として重要なものである。

## 2.3 噴煙の数値シミュレーション

フンガ火山噴火で観察された高度50 kmを超す噴煙 (Carr et al., 2022) は、観測史上もっとも高い噴煙のひとつとなった。非常に強い噴火であるピナツボ火山1991年噴火の噴煙高度は40 km程度であり (Holasek et al., 1996)、フンガ火山噴火では多量の海水が関与したことが噴煙高度に影響を与えたと考えられる。海域での火山噴火現象を理解する上で、マグマ物質と海水の混合比と噴煙ダイナミクスの関係を議論することは重要である。

フンガ火山は4:00-4:30頃に最も強い噴火フェーズがあったと観察されている。この噴火フェーズに関して数値シミュレーションを実施した。計算にはSuzuki and Koyaguchi (2009) が開発した3次元流体力学モデルを用いた。滑り条件を与えた平坦な海水面に円形の火口を仮定し、そこからマグマ物質と海水

の混合物を高速で噴出させた。計算領域内は気象再解析で得られた温度・密度・圧力・風速の大気条件を与えた。単純のために、大気条件は水平方向には一様とした。マグマと海水の温度を固定し、その混合比を変えることで噴出混合物の温度・密度が異なるシミュレーションを行った。また、それぞれの混合比に対し、噴出率を変えた計算を行った。

数値計算の結果、マグマ物質と海水の混合比によって噴煙高度は大きく異なることが分かった。海水混合量が多い場合、噴出混合物の温度は低く、密度は大きい。そのため、噴出後に取り込んだ大気を効率よく膨張させることができず、噴煙は重い状態で火砕流を形成した。その結果、噴煙は火砕流を形成し、噴煙高度は低くなった。一方、海水混合量が少ない場合はマグマ噴火として振る舞い、噴煙高度は40 km程度となった。混合物中における海水の質量分率が0.06–0.12程度の時、噴煙の最高高度は50 kmを超し、フンガ火山噴火の観測データを説明することができた。これらの結果より、10 wt%程度の水が加わることでマグマ噴火よりも高い噴煙を形成することが明らかになった。

### 3. 火山性大気波動による全球規模での津波発生・伝播メカニズムの解明（テーマ2）

フンガ火山噴火後に顕著な津波が観測された（Imamura et al., 2022; 石峯, 2022; Kakinuma, 2022; 柿沼, 2022; Kubo et al., 2022; 田中ら, 2022; 田中・石丸, 2022; 徳田ら, 2022; Wang et al., 2022a,b; 綿田, 2022a; Yamada et al., 2022; 山田, 2022a,b）。その到達時刻は通常の津波より早く、最大波高が第一波から遅れて（日本付近では3–5時間後）到達し、継続時間が通常の津波よりも長く、海域経由では到達できない地中海や大西洋で観測された、等の特徴があった。そのため、防災上も大きな問題を投げかけた。過去の類似の事例としては、1883年のクラカタウ火山噴火時に、大気圧変動が津波を引き起こしたことが知られている。19世紀ではあったが、噴火時に顕著な大気波動が世界各地で観測された事から、大気重力波と海面の共振で発生した可能性が指摘されていた（Press and Harkrider, 1966; 綿田, 2022b）。今回の大気圧変動や津波は、世界中のGNSS、微気圧計や潮位計・海底圧力計で記録されている。テーマ2では、これらのデータを収集して解析し、火山噴火による大気圏の挙動と津波の励起・伝播メカニズムを解明する。津波の励起・伝播メカニズムの解明は、今後同様の現象が発生した場合にどの程度の津波が発生するのかを即時的に把握するためにも重要である。

2022年1月15日、フンガ火山の噴火に伴い、世界に展開された大気圧観測網が顕著な気圧の増加を観測

した（e.g., Matoza et al., 2022; 西田, 2022）。これは、大気ラム波と呼ばれる大気境界波の一種である。この波は火山噴火時に励起され、約300 m/sの速度で全球規模に伝播し、その後数日に渡って地球を周回した（図4）。さらに、世界の海底に展開された水圧観測網が、地球規模で伝播する津波を明瞭に観測した（図5）。

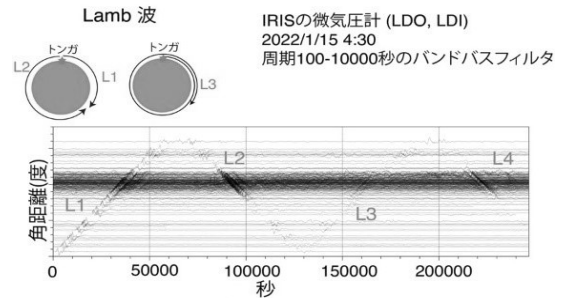


図-4 縦軸はフンガ火山からの距離（角度）、横軸は2022年1月15日 4:30 UTC からの経過時間（秒）。微気圧計記録に周期100秒から10000秒のバンドパスフィルタをかけた。Central and Eastern US Network, Caribbean USGS Network, Geoscope, IRIS IDA, IRIS USGS のデータを使用した。

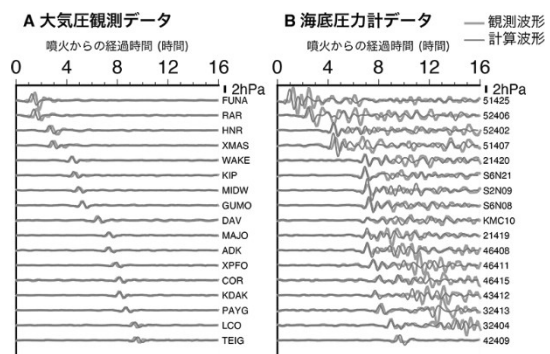


図-5 ラム波の伝播に伴う津波発生の数値計算波形と観測波形の比較。A は大気圧観測波形の時系列、B は海底圧力観測波形の時系列。灰色線は観測波形を、赤線はシミュレーション結果による波形である。各波形の右横にあるアルファベット、数字は観測点の名前を示している。Kubota et al. (2022) プレスリリースの図より引用。

ラム波の日本通過時に注目しアメダスの観測記録を解析したところ、個々の観測点においては、対応する気温・風速を記録していなかった。しかし、気圧パルスの到着時刻にあわせて気温・風速記録を足し合わせたところ、ラム波の伝播と整合した気圧・風速変化の存在が明らかとなった。ラム波により輸送された全波動エネルギーは $4.2 \times 10^{16} \text{J}$ であった（Watada et al., 2023）。

今回の噴火による津波には2つの大きな特徴があった（Kubota et al., 2022; 久保田ら, 2023）を波源として予想される津波到達時刻よりも数時間ほど早く到達した点である。この津波の第一波は、観測さ

れた大気ラム波とともに伝播しており、太平洋における平均的な津波の伝播速度（200～220 m/s）より有意に速く伝播した。2つ目は、津波の継続時間が数日と、通常の地震に比べて非常に長い点である。これらの特徴を理解するために、数値シミュレーションを実施した（Kubota et al., 2022）。

シミュレーションでは、まず世界各地で観測された大気圧データを基に、ラム波が300 m/sで伝播すると仮定してラム波の伝播シミュレーションを実施し、大気圧変化を計算した（図5A）。続いて、気圧変化による津波の発生・伝播シミュレーションを実施し、津波による海底における水圧変化を計算した（図5B）。

世界の海底水圧観測網について、シミュレーションにより計算された波形を実際の観測記録と比較したところ、計算波形はラム波の速度（300m/s）で伝播する第一波部分をよく再現した（図5B）。移動する気圧の波と津波の伝播速度が近い値となるとき、伝播距離の増大に伴って海面変動の振幅が大きくなる「共振現象」（「プラウドマン効果」とも呼ばれる）が起こることが知られている。第一波は伝播と共に増大していないことから典型的な共振現象とはいえ、むしろ大気ラム波による海面の強制振動として引き起こされたことを示唆している。

励起メカニズムについて模式図を図6に示す。大気中では、約300 m/sの速度でラム波が伝播する。海面では、ラム波が海水を強制的に押し出すことにより、ラム波と同じ速度で海面の隆起の波が伝播する（図6中[1]の波）。続いて、津波の速度（約200～220 m/s）で伝播する波が到来する（図中[2]の波）。噴火に伴うカルデラの陥没の空間スケールは半径2km程度と小さく、単独で長波長の津波を効率的には励起する事は難しい。そのために、後続波の励起には大きく分けて3つの要因が考えられる。1つめとしては第一波として伝わる隆起の波の体積を保存するために生じる沈降の波、2つめは大気重力波（約200-250m/s）と津波の共振（プラウドマン効果）によって生じる波、3つめは噴火に伴う火山付近での海底地形変化により生じる津波である（Kubota et al., 2022）。今回観測された津波の全貌を理解するためには、これらの要因を今後詳細に検討することが重要である。

今回観測された津波の継続時間が数日と長かった特徴を理解するためには、大気-海洋のカップリングを考えることが重要となる。図4で示したように、大気ラム波は数日程度の継続時間を持つ。定性的には、大気側から継続的に津波へエネルギーを運んでいることが、長い津波の継続時間の要因だと考えられる。防災上も津波の継続時間は重要な情報であるため、今後詳細な検討が必要である。

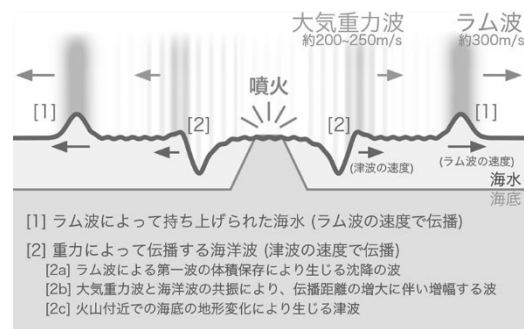


図-6 トンガ火山からの津波の発生と伝播の模式図。Kubota et al. (2022) プレスリリースの図より引用。

日本付近の海底水圧計データを詳細に解析したところ、この津波は、水深が浅いほど大気ラム波と津波の結合が弱くなるため、海岸に近づくと振幅が小さくなるということがわかった（Kubo et al., 2022; Yamada et al., 2022, Ho et al., 2023）。津波の第一波は日本に近づき大陸棚斜面を伝播する際に分裂し、伝播速度の遅い海洋重力波の速度で伝播した。そのため、海岸で観測される津波の第一波は、ラム波が通過してから数千秒遅れて到来することとなった。また西南日本沿岸では、南北方向に伝播する顕著な短周期成分に富む後続波を検出した（Ogiso and Tsushima, 2023）。

今回のフンガ火山の噴火では、地球規模で伝播する津波が発生した。このような大気波動起源の津波は、始めて現代のデジタル記録システムで観測され、多くの知見をもたらした。防災上も、今後津波警報システムにおいて考慮されるべきものであると考えられる（近貞, 2022）。より具体的には、火山から遠く離れた場所の津波の最大振幅を即時的に予測するためには、大気圧観測データなどを利用して大気重力波の励起量を高い精度で即時的に見積もることが重要となろう。

#### 4. 水産被害（テーマ3）

今回の津波が発生した1月はカキ、ホタテ、ホヤ、早ワカメ等の収穫の時期であった。国内の水産被害としては、高知県をはじめとする5つの県で沿岸漁業の漁船の転覆・沈没等37隻の被害があり、徳島県をはじめ7つの県で漁具・養殖施設等の被害が報告された（Imamura et al., 2022）。これまで、津波による水産被害は1960年チリ津波、2010年チリ津波、2011年東北地方太平洋沖地震津波などで報告されているが、これらは地震によって発生した長周期の津波によるものである。これらの被害分析から、漁船では高さ1mまたは流速1 m/s 以上になると被害が出始め（Suppasri et al., 2014）、養殖施設では流速1 m/s 以上になると、最高水位に関係なく被害が出始めるこ



とが分かっている (Suppasri et al., 2018)。しかしながら、今回のような火山噴火による非地震性でかつ地震性津波に比べて短周期の津波によって漁業施設が被災した事例はこれまでなかった。このように、従来とは異なる特長の津波をもたらす水産被害を明らかにするため、ヒアリング調査、数値解析、アンケート調査を行い、今後の適切な対策を検討することが本テーマの目的である。

#### 4.1 ヒアリング調査

宮古漁協と三陸やまだ漁協、大船渡漁協末崎支所、松島湾での漁師と牡鹿半島での漁師を訪問した。三陸地方では平常時または高波・高潮のときでも養殖施設が耐えられる必要があり、重いアンカーで移動されないように工夫している。2010年チリ津波の際は漂流・移動した養殖施設があったが、今回は、係留位置がずれたり、養殖物をぶら下げているロープが絡まったり、水産物同士が衝突する被害がほとんどであることがわかった。これは、津波の周期の違いによるものではないかと思われる。特に被害が多かった山田湾(図7, 8)と大船渡湾は湾の入口に被害が集中しており、狭い場所で流速が大きくなったことにより被害が出たことが考えられる。一方、松島湾では三陸地方に比べて緩やかな波かつ水深が浅いため簡単な杭で固定している。そのため、一つの杭が倒れると連鎖的に被害が発生した。

#### 4.2 数値解析

トンガ津波のような非地震性津波による養殖施設被害の事例は少なく、被害に関する知見は少ない。そのため、トンガ津波の特徴である短周期成分が養殖施設に与えた影響の検討や非地震性津波による養殖施設の被害メカニズムを明らかにすることは、津波対策を行う上で重要である。そこで、津波数値計算と漂流計算を行った。津波数値計算では、始めにラム波モデルによって噴火によって生じた気圧のシミュレーションを行った。その後、得られた気圧をCoupling Air and Water waveモデルの気圧項に入力することによって、津波のシミュレーションを行った。また、漂流計算では津波数値計算で得られた水位と流速を用いて養殖施設に作用する流体力を計算し、剛体モデルに逐一入力することで養殖施設の並進運動(x,y)と回転運動(z)の運動方程式をRunge-Kutta法により解いていき、養殖施設の位置と角度の数値解を求めた。

主な解析結果として、湾奥に向かうに従って水位が大きくなっていること、湾口と局所的に浅海となっている場所で流速が速くなっていること、流速が一定値を超えると水位に関係なく養殖施設被害が発生

すること、殆どの施設は南北方向の変位より東西方向の変位の方が大きく、東西方向で隣接している養殖施設の衝突によって被害が生じたことを示した。

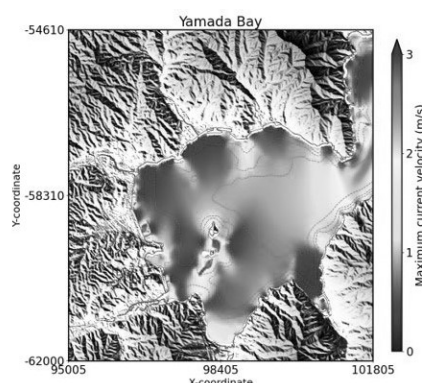


図-7 山田湾の最高水位

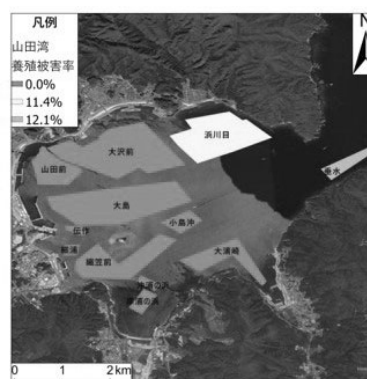


図-8 山田湾での養殖施設被害図

#### 4.3 アンケート調査

インターネットによるアンケート調査では、定量的アプローチによる仮説の検証を行った。調査票は、被害の状況、リスク認識、緊急対応、復旧、津波による漁業被害のリスクが高い開発途上国への国際協力等に関する21問(本調査時)から構成されており、対象者は、調査会社に登録されたモニターの中から業種を「漁業関連」「水産加工・サービス業関連」に限定して抽出し、サンプルサイズは200とした。主な調査結果については以下の通りである。

「これまで、国外で発生した地震・噴火等に伴う津波により、日本において漁業被害が発生する可能性がある」と認識していましたか。」との質問に対し、「非常に認識していた」「認識していた」「やや認識していた」と回答した人の割合は、それぞれ2.5%、19.0%、32.0%であった。また、「今後10年以内に、国外で発生した地震・噴火等に伴う津波により、日本において漁業被害が発生する可能性がある」と思いますか。」との質問に対し、「非常にそう思う」「そ

う思う」「ややそう思う」と回答した人の割合は、それぞれ12.5%、25.5%、43.0%であった。さらに、「今後、津波による漁業被害のリスクが高い開発途上国に対して、日本は積極的に漁業関連の国際協力・貢献を行うべきであると思いますか。」との質問に対しては、「非常にそう思う」「そう思う」「ややそう思う」と回答した人の割合は、それぞれ4.0%、24.5%、44.0%であった。

このように、「漁業関連」「水産加工・サービス業関連」に携わる人の多くが、今後10年以内に日本において国外で発生した地震・噴火等に伴う津波による漁業被害が発生する可能性について認識しているとともに、津波による漁業被害のリスクが高い開発途上国への国際協力についても、概ね肯定的に捉えていることがわかった。

## 5. 社会的影響・社会的側面の調査（テーマ4）

本節では、気象庁等でまとめられた議論を踏まえつつトンガ諸島の火山噴火による潮位変化以降の情報に関する議論と避難に関するポイント、奄美大島における事例調査、今後の予定について論じる。

### 5.1 トンガ諸島の火山噴火による潮位変化以降の情報に関する改善

2022年1月15日トンガ諸島の火山噴火による潮位変化に際しては、太平洋沿岸の広い範囲に津波警報や津波注意報が発表された。この潮位変化は、地震に伴い発生する通常の津波とは異なるが、防災上の観点から津波警報の仕組みを使って防災対応が呼びかけられた。2022年5月、気象庁では「火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方検討会」が設置され、噴煙高度約15,000m以上の大規模噴火が観測された場合に「津波発生の可能性」を発表すること、火山噴火による地形変化や気圧波に伴う津波や潮位変化など海外の潮位観測点で警報・注意報の発表基準を超えた場合に地震による津波と同様に「津波警報・注意報」の枠組みで情報を出していくこと、また適宜「遠地震に関する情報」を活用した情報発信を行うことが確認された（気象庁、2022）。

なお、気象庁の同検討会では、今回の潮位変化を教訓として、現象面から、従来の近地地震、遠地地震に加えて、火山性津波（海底地すべり、島嶼部の火山活動による山体崩壊、海底噴火など）を加味し、<1>リードタイムが短く、日本陸地での揺れがある現象、<2>リードタイムが短く、日本陸地での揺れない現象、<3>リードタイムが長く、日本陸地での揺れない現象という3パターンに分類された。

今回の潮位変化を踏まえれば、上記で検討はなされなかったが避難行動に関し、二つポイントがある。

第一に揺れない地震、夜間の地震という避難率が低くとどまった要因である。①遠地津波ならではの問題として揺れないので避難しない人が多かったこと、②深夜の津波情報で避難しなければならなかったこと、などが避難に与えた要因として課題であった。これは揺れが比較的小さいアウトライズに伴う津波と共通する課題である。

第二に「津波注意報」をどう伝えるかという課題である。大津波警報の発表時には「最大クラスの津波により浸水が想定される地域を対象とする」、津波警報の発表時には「海岸堤防等が無い又は海岸堤防等が低い場合、高さ3mの津波によって浸水が想定される地域を対象とする」とされている。一方、津波注意報の発表時には「漁業従事者、沿岸の港湾施設等で仕事に従事する者、海水浴客等を念頭に、海岸堤防等より海側の地域を対象とする」となっており、基本的に堤外にいる人によびかけることとなっている。だが東北地方太平洋沖地震の余震での津波注意報や2019年6月の山形県沖地震での津波注意報などでも、どの地域の人まで逃げればよいか住民や自治体に理解されておらず、混乱を生んでいる。これらは「注意報」ならではの課題ともいえる。

これに関し、①自治体郵送調査、②国内現地調査、③住民郵送調査を行った。以下①、②を報告する。

### 5.2 自治体郵送調査

消防庁の調査によれば（内閣府・消防庁、2022）、警報が発表された自治体（25自治体）では、警報を伝達したのは100%（25自治体）、避難指示を発したのは84.0%（21自治体）である。一方、津波注意報が発表された自治体（353自治体）では、注意報を伝達したのは89.5%（316自治体）、避難指示を発したのは15.9%（56自治体）に留まっている。注意報ほど、情報の発出は低調であり、各市町村で判断が分かれた。

これをより詳細に確認するために、津波警報・注意報が発表された沿岸の市町村を対象に調査を実施の上、ヒアリングを実施した（三宅ら、2023）。調査は沿岸の352市町村を対象に、2022年12月2日～2023年1月27日の期間、郵送配布・郵送回収方式で行った（回収率:51.4%）。自治体における住民への津波注意報の伝達の有無、津波注意報発表を受けた避難指示の発出の有無や避難指示の対象地域、津波注意報の伝達や、避難指示の発出をしなかった場合には、その理由について問うている。以下に調査結果の要旨を述べる。

#### (1) 避難指示の対象地域を巡る混乱

調査結果（表2）によると、注意報が発表された164市町村のうち、71%（116市町村）が津波注意報を住民に伝達し、18%（30市町村）が避難指示を発出し

た。避難指示の対象地域は、「海岸堤防より海側」が36.7%（11市町村）と最多だったものの、「市町村全域」が3.3%（1村）「沿岸部（特に定めなかった）」が23.3%（7市町）あった。「市町村全域」に発出したのは、沖縄県伊平屋村の1村。「沿岸部（特にさだめなかった）」に発出したのは、青森県八戸市、宮城県七ヶ浜町、宮城県塩竈市、宮城県女川町、千葉県一宮町、千葉県大網白里市、静岡県伊東市の7市町であった。電話での追加調査によると、4市町村は、担当者が注意報の避難行動に関するガイドラインを把握していないと回答し、その他の4市町は、ガイドラインを把握した上であえて沿岸部全体に呼び掛けていた。呼びかける手段として、防災無線を使用せざるを得ず、堤外の対象地域や対象者に対して、ピンポイントに避難を呼びかけることが難しいという声もあった。いずれにしても、ガイドラインにおける「沿岸の」「海岸堤防等より海側」などの表現のわかりにくさ、「漁業関係者」「港湾施設等で仕事に従事する者」などの対象者の不明確さが、自治体の避難指示発出を巡る対応に、混乱を生じさせていると考えられる。

#### (2) 自治体による未知の現象に対する異例の対応

本事象では、気象庁が「若干の海面変動が予想されるが、被害の心配はない」と発表した後に、最大波として1.2mに達する潮位変動を観測し、気象庁は防災上の観点から津波警報・注意報を臨時的に適用して深夜に避難を呼びかけた。気象庁側の対応が二転三転し、深夜の津波情報で避難しなければならなかったことで、自治体の対応が分かれたと考えられる。

自治体の今回における理想的な対応とは「津波注意報が発表されたことを対象者に十分に周知し、注意報の対象地域（海岸堤防より海側のエリア）に対して避難指示を発出する」であったと考えるが、実態はそうではない。津波注意報を伝達せず、避難指示も発出しなかった自治体は、29.6%（49市町村）ある。注意報の伝達や避難指示の発出を巡る対応が自治体によって大きく分かれたことも、混乱があったことの証左である。

本事象を受け、気象庁は火山噴火による潮位変化で、地震津波と同様に「津波警報・注意報」の枠組みで情報を出すことになった。今後、自治体においては、本事象を想定した避難指示の発令基準を設定するなど、事前の準備が求められる。

なお、潮位変化というよりは、津波注意報における呼びかけに関して、現在のガイドラインは、自治体に十分に理解されておらず、自治体の避難情報の運用実態とも乖離している。実態を踏まえたより良いガイドラインの在り方を検討する必要がある。

表-2 フンガ火山噴火による潮位変動における情報発出

|       |         | 避難指示  |        | 計      |
|-------|---------|-------|--------|--------|
|       |         | 発出した  | 発出なかった |        |
| 津波注意報 | 伝達した    | 30自治体 | 86自治体  | 116自治体 |
|       | 伝達しなかった | 0自治体  | 49自治体  | 49自治体  |
|       | 計       | 30自治体 | 135自治体 | 165自治体 |

### 5.3 事例調査—奄美市、大和村の事例

2022年1月15日13時（日本時間）頃にフンガ火山で発生した噴火によって、同日23時55分に鹿児島県奄美市にある奄美市名瀬小湊で1.2mの潮位変化が観測され、翌16日0時15分には気象庁から津波警報が岩手県沿岸部ならびに奄美群島、トカラ列島に発表され、北海道から鹿児島県の太平洋沿岸や沖縄県などに津波注意報が発表された。それにともない、各沿岸部の自治体は避難情報を発表した。我々は、事例調査として、避難指示が発せられた奄美市総務課、大和村総務課に対して3月24日にヒアリング調査を行った。以下はその要旨である。

#### (1) 噴火直後

奄美市ならびに大和村のいずれも、噴火のことは担当者がニュースで認識したが、その後、特に情報収集は行っていない。鹿児島県から若干の海面変動に関する津波予報の発表を確認した程度であった。そのため、津波警報発表までの間、危機対応は行われていない。

#### (2) 津波警報発表後

気象庁からの津波警報は、Jアラートの自動放送で発表が覚知された。奄美市においては、16日0時18分に災害対策本部が設置され、市内全域に避難指示が発表、エリアメールなどを通じて高台への避難が呼びかけられた。その後も繰り返し、防災行政無線から高台への避難の広報がなされた（0時40分、2時40分、3時5分）。一方の大和村においても0時25分に災害対策本部が設置され、消防団員によって避難の呼びかけがなされた。その後、村内全域を対象とした避難指示が発表、避難の継続の呼びかけが防災行政無線を通じて複数回（2時30分、3時27分、5時7分）、行われた。

なお、この間に气象台などから自治体への情報提供はなく、テレビニュースが自治体の主たる情報手段であった。一方で、報道機関からの取材依頼は非常に多く、電話が鳴りやまない状況であった。

夜が明け、7時30分に津波警報から津波注意報へと引き下げられると、奄美市、大和村いずれも避難指示を解除した。大和村においては、全消防団員に対

しても解除の連絡が行われた。ただし、この解除についてはいずれの自治体も判断に迷いがあったことが明らかとなった。津波注意報に引き下げられたことで、避難指示を解除しても良いのか、安全になったと捉えられかねないとの懸念である。奄美市では、「海に入らないように」と注意するように心がけたという。その後、14時には津波注意報も解除された。

奄美市、大和村はいずれも津波警報をトリガーとして全域に対して避難指示が発表され、その解除のタイミングに関しては迷いが生じていた。

### (3) 住民の反応

では、実際の住民の反応がどうであったか。

特筆すべきは大和村である。各集落の消防団や自主防災組織を通じて避難状況の確認が行われたが、960名の避難が確認されたという（1月15日時点での人口は1,429名）。指定されていない避難場所への避難者もいたとの話であるが、深夜にもかかわらず、多くの避難が行われた。その要因として、村では、普段から年1回の避難訓練を行うなど、地域ぐるみで防災意識の向上を企図してきたことが大きいという。奄美大島は台風の常襲地帯であることから、村内集落ごとに指定避難場所を設置し、ほとんどの集落で自主防災組織がある。これらが有効に働き、多くの人が避難場所や高台へと避難したとされる。

一方、奄美市では車の渋滞が多くニュースにおいて取り上げられたように、高台を目指して、多くの人が車で避難を行った。高台として、奄美市大浜海浜公園／ループ橋（高齢者施設・奄美佳南園）／あかさき公園／春日団地／東ヶ丘団地／陸上自衛隊奄美駐屯地があり、これらに向かう車で渋滞した一方で、少し高い所にあった大島支庁には60人程度しか避難していなかった。とにかく、高い所へ、少しでも速く避難を企図した結果であろうと考えられる。

なお総じて、住民の避難行動のきっかけとしては、近所の人の声かけ、自治会や消防・警察の呼びかけ、また、防災行政無線が繰り返し流れたこと、東日本大震災時の津波の映像を思い出したこと、奄美がテレビにずっと映り、テレビニュースで「高台へ逃げろ」とでていたこと、1.2mの津波がすでに奄美市名瀬小湊に到達していたことなどがあげられた。また、これらの避難について、夜間で家族が一緒にいたために即座に避難を決断できたこと、人手があったから高台において、避難誘導ができたという声も聞かれた（奄美市東ヶ丘団地）。

### (4) 課題

今後の課題として、高齢者の避難、避難先でのトイレ、住民がハザードマップを確認していないこと（奄美市は2021年に全戸配布を行った）などの防災意識の向上、職員による避難誘導の方法、呼びかけ

の対象地域や範囲（大和村は「全域」にだすと決めていた）、観光客向けの情報提供などがあげられた。

## 5.4 残された課題

なお、テーマ4では、ほかにも現地および周辺国における噴火被害の状況についての調査を実施済みであり、追って報告する予定である。

## 謝 辞

本稿は、科学研究費特別研究促進費「トンガ海底火山噴火とそれに伴う津波の予測と災害に関する総合調査」（21K21353）による支援をうけた。表1に示した研究分担者以外にも、大湊隆雄氏（東大地震研）はテーマ1の取りまとめを、市原美恵氏（東大地震研）、中島健介氏（九州大学）、久保田達也・齊藤竜彦氏（防災科学技術研究所）、三宅真太郎（東大学際情報学府）は、研究成果を提供して下さいました。

## 参考文献

- Borrero, J.C., Cronin, S.J., Latu'ila, F.H., Tukuafu, P. et al. (2023): Tsunami Runup and Inundation in Tonga from the January 2022 Eruption of Hunga Volcano. *Pure and Applied Geophysics*, Vol.180, 1-22.
- Brenna, M. et al. (2022): Post-caldera volcanism reveals shallow priming of an intra-ocean arc andesitic caldera: Hunga volcano, Tonga, SW Pacific. *Lithos*, 412-413, 106614.
- Carr, J. L., Horváth, Á., Wu, D. L., and Friberg, M. D. (2022): Stereo plume height and motion retrievals for the record-setting Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption of 15 January 2022. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 49, e2022GL098131.
- 近貞直孝(2022): 非地震性津波に備える, 月刊地球, 44巻, 10号.
- Ho, T.-C., Mori, N., Yamada, M. (2023): Ocean gravity waves generated by the meteotsunami at the Japan Trench following the 2022 Tonga volcanic eruption. *Earth, Planets and Space*, Vol.75, 25. <https://doi.org/10.1186/s40623-023-01775-x>.
- Holasek, R. E., Self, S., and Woods, A. W. (1996): Satellite observations and interpretation of the 1991 Mount Pinatubo eruption plumes. *J. Geophys. Res.*, Vol. 101, No. B12, pp. 27635–27655.
- Imamura, F., Suppasri, A., Arikawa, T., Koshimura, S., Satake, K., Tanioka, Y. (2022): Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022,

- Pure and Applied Geophysics, Vol. 179, pp. 1549-1560.
- 石峯康浩 (2022) : フンガトンガ・フンガハアパイ火山の2022年噴火とそれに伴う津波の概要 (速報), 国際津波防災学会誌, Vol.3, pp. 36-44.
- Kakinuma, T. (2022): Tsunamis generated and amplified by atmospheric pressure waves due to an eruption over seabed topography, *Geosciences*, Vol. 12 No. 6, p. 232, <https://doi.org/10.3390/geosciences12060232>.
- 柿沼太郎 (2022) : 噴火に伴う複数の気圧波によって地形上で生成・増幅される津波. 津波工学研究報告, 第39号, pp. 91-100.
- 気象庁 火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方検討会 (2022) : 火山噴火等による潮位変化に関する情報のあり方 (報告書)
- Kubo, H., Kubota, T., Suzuki, W., Aoi, S., Sandanbata, O., Chikasada, N., Ueda, H. (2022): Ocean-Wave phenomenon around Japan due to the 2022 Tonga eruption observed by the wide and dense ocean-bottom pressure gauge networks, *Earth, Planets and Space*, Vol. 74, 104. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01663-w>.
- Kubota, T., Saito, T., Nishida, K. (2022): Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption, *Science*, Vol. 377 No. 6601, pp. 91-94, <https://doi.org/10.1126/science.abo4364>.
- 久保田達矢, 齊藤竜彦, 西田究 (2023): 2022年1月15日のトンガの火山噴火に伴う全球規模の津波発生と伝播, *海洋調査技術*, 35, 23-26.
- 前野 深 (2022) : 地球を震わせたフンガ火山の爆発的噴火, *科学*, 92巻, 6号, pp.559-565.
- Matoza, R.S., D. Fee, J.D. Assink, A. M. Iezzi, D.N. Green, K. Kim, L. Toney, ..., Nishida, K., ..., Watada, S., Ichihara, M. et al. (2022): Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga, *Science*, Vol. 377, No. 6601, pp. 95-100. <https://doi.org/10.1126/science.abo7063>.
- 三宅真太郎・関谷直也・安本真也・佐藤翔輔・吉本充宏・石峯康浩・秦康範 (2023) : トンガ海底火山の噴火に伴う潮位変化に対する自治体対応—津波注意報を巡る情報発信の課題—, 第42回日本自然災害学会学術講演会, 2023年9月17日, 金沢大学角間キャンパス
- 内閣府・消防庁 (2022) : 津波における避難指示発令等について (府政防第651号/消防災第60号)
- 西田究 (2022) : トンガ火山の噴火で励起された大気波動と海面変動, *Japan Geoscience Letters*, Vol.18 (2).
- Ogiso, M., Tsushima, H. (2023): Ocean-Wave Gradiometry: Visualizing and Extracting Propagation Features of the 15 January 2022 Tsunami Wavefield with Dense Ocean-Bottom Pressure Gauge Arrays. *Seismological Research Letters*, Vol. 94(2A), 626-636. <https://doi.org/10.1785/0220220151>.
- Press F. and Harkrider D. (1966): Air-sea waves from the explosion of Krakatoa. *Science*, Vol. 54(3754):1325-7.
- Putirka, K. D. (2008): Thermometers and Barometers for Volcanic Systems. *Rev. Mineralogy Geochem.*, Vol. 69, 61-120.
- Seabrook, S. et al. (2023): Pyroclastic density currents explain far-reaching and diverse seafloor impacts of the 2022 Hunga Tonga Hunga Ha'apai eruption. *Research Square*, doi:10.21203/rs.3.rs-2395332/v1.
- Suppasri, A., Muhari, A., Futami, T., Imamura, F. and Shuto, N. (2014): Loss functions of small marine vessels based on surveyed data and numerical simulation of the 2011 Great East Japan tsunami, *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering-ASCE*, Vol. 140, No. 5, 04014018.
- Suppasri, A., Fukui, K., Yamashita, K., Leelawat, N., Hiroyuki, O. and Imamura, F. (2018): Developing fragility functions for aquaculture rafts and eelgrass in the case of the 2011 Great East Japan tsunami, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.18, pp. 145-155.
- Suzuki, Y.J. and Koyaguchi, T. (2009): A three-dimensional numerical simulation of spreading umbrella clouds. *J. Geophys. Res.*, Vol. 114, B0320.
- 田中健路, 石丸克弥, 鈴木悠太, 村上太一(2022) : 火山噴火に伴う気象津波の風況依存性に関する数値解析:土木学会論文集B2(海岸工学), 78巻, P0159.
- 田中健路・石丸克弥 (2022) : フンガ・トンガフンガ・ハアパイ火山噴火に伴う空気振動に誘発された津波について, 自然災害研究協議会研究論文集, 第8号, pp. 35-38.
- 徳田達彦・有川太郎・高川智博・千田優・Anawat SUPPASRI・近貞直孝・森信人・今村文彦 (2022): 2022年フンガ・トンガ＝フンガ・ハアパイ噴火による津波伝播に関する考察土木学会論文集B2(海岸工学), 78巻, 2号, p. I\_145-I\_150, [https://doi.org/10.2208/kaigan.78.2\\_I\\_145](https://doi.org/10.2208/kaigan.78.2_I_145).
- Wang, Y., Imai, K., Kusumoto, S., and Takahashi, N. (2022a): Tsunami early warning of the Hunga Volcanic Eruption Using an ocean floor observation network off the Japanese Islands. *Seismological Research Letters*. <https://doi.org/10.1785/0220220098>
- Wang, Y., Wang, P., Kong, H., and Wong, C.-S. Wong (2022b): Tsunamis in Lingding Bay, China, caused by

- the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophysical Journal International*. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac291>
- 綿田辰吾 (2022a) : 遅れてやってきた2022年フンガ火山噴火起源の最大波高津波, *科学*, 92巻, 6号, pp. 565-570.
- 綿田辰吾 (2022b) : Press and Harkrider (1962) Propagation of acoustic-gravity waves in the atmosphere と Harkrider (1964), Theoretical and observed acoustic-gravity waves from explosive source in the atmosphere の修正点, *月刊地球*, 44巻10号.
- Watada, S., Imanishi Y., Tanaka K. (2023): Detection of Air Temperature and Wind Changes Synchronized with the Lamb Wave from the 2022 Tonga Volcanic Eruption. *Geophys. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1029/2022GL100884>.
- Waters, L. E. and Lange, R. A. (2015) An updated calibration of the plagioclase-liquid hygrometer-thermometer applicable to basalts through rhyolites. *Am. Mineral.*, Vol. 100, 2172–2184.
- Yamada, M., T. Ho, J. Mori, Y. Nishikawa, and M. Yamamoto (2022): Tsunami triggered by the Lamb Wave from the 2022 Tonga Volcanic eruption and transition in the offshore Japan region. *Geophys. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1029/2022gl098752>.
- 山田真澄 (2022a) : トンガ火山の噴火による「津波」の謎, *なみふる*, Vol. 130, 4-5.
- 山田真澄 (2022b) トンガ火山の噴火で観測された「津波」の謎, *DPRI Newsletter*, No.10.

# 能登半島北東部において継続する地震活動に関する総合調査

平松良浩<sup>1</sup>・蔵下英司<sup>2</sup>・酒井慎一<sup>3</sup>・飯高 隆<sup>3</sup>・勝間田明男<sup>4</sup>  
・岡田知己<sup>5</sup>・吉田圭佑<sup>5</sup>・西村卓也<sup>6</sup>・太田雄策<sup>5</sup>・木下陽平<sup>7</sup>  
・吉村令慧<sup>6</sup>・後藤忠徳<sup>8</sup>・笠谷貴史<sup>9</sup>・田中愛幸<sup>10</sup>・宮澤理稔<sup>6</sup>  
・森下知晃<sup>1</sup>・鹿児島渉悟<sup>11</sup>・石山達也<sup>2</sup>・安江健一<sup>4</sup>・廣内大助<sup>12</sup>  
・松多信尚<sup>13</sup>・岩田知孝<sup>6</sup>・大堀道広<sup>14</sup>・村田 晶<sup>1</sup>

- 1 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系
- 2 東京大学地震研究所
- 3 東京大学大学院情報学環
- 4 富山大学学術研究部都市デザイン学系
- 5 東北大学大学院理学研究科
- 6 京都大学防災研究所
- 7 筑波大学システム情報系
- 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 富山大学学術研究部理学系
- 12 信州大学学術研究院教育学系
- 13 岡山大学学術研究院教育学域
- 14 滋賀県立大学環境科学部

## 要 旨

能登半島北東部では、2020年12月頃から地震数の顕著な増加と局所的な非定常地殻変動が観測され、活発な地震活動が継続する中、2022年6月19日にマグニチュード5.4（最大震度6弱）の地震が発生した。この長期間継続する地震活動や地殻変動の原因及び2022年6月19日の地震による災害像を明らかにするため、令和4年度科学研究費（特別研究促進費）による総合調査により、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、強震観測を実施した。

### 1. はじめに

能登半島北東部では、2018年6月頃から地震数が増え始め、2020年12月には地震数の増加が顕著となり、それと同期するように局所的な非定常地殻変動が始まった（平松、2022；西村・他、2022）。その後、有感地震が増加する中、2021年9月16日にはマグニチュード（M）5.1（最大震度5弱）、2022年6月19日にはM5.4（最大震度6弱）の地震が発生した（図1）。2022年のM5.4の地震では、建物被害や斜面崩壊、水道管の破裂等が生じ、負傷者もあった（石川県災害対策本部、2022）。そのため、今後の地震活動の推移に高

い社会的関心が寄せられることとなった。能登半島北東部での地震活動及び非定常地殻変動については、本総合調査の実施以前の臨時のGNSS観測や電磁気観測により得られたデータの解析から流体が関連する可能性が指摘されていたが、観測データが乏しく、モデルの特定には至らなかった。この長期間継続する地震活動及び非定常地殻変動の発生場や原因並びに2022年のM5.4の地震による災害像を明らかにするため、文部科学省科学研究費助成事業（特別研究促進費）の交付を受けて、総合的な緊急調査を実施した。本稿ではその概要について報告する。

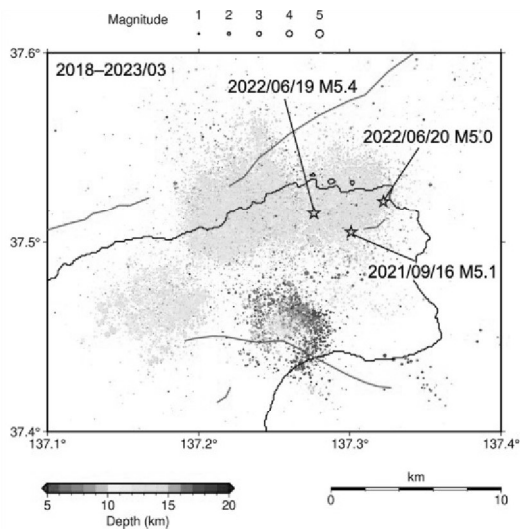


図-1 能登半島北東部における地震活動(2018年から2023年3月末まで)。星印はM5以上の地震、赤線は活断層を表す。

## 2. 研究計画の概要

本総合調査は以下の7つのテーマからなり、地震学、測地学、地球電磁気学、岩石学、地球化学、変動地形学、地震工学、強震動地震学を専門とする全12機関、計23名の研究者が研究分担者として参加した(表1)。テーマ1 陸域地震観測による群発地震発生メカニズムの解明

- 群発地震の活動推移把握とモーメントテンソルの推定

- 流体を起源とする地殻内反射面の推定

テーマ2 測地観測による地殻変動の調査

- 地殻変動詳細分布の解明と地殻変動源モデルの推定

- 地殻変動源による地震活動への影響評価

テーマ3 電磁気観測による地下電気比抵抗構造の解明

- 3次元比抵抗構造モデルの高度化

- 電磁場の長期連続観測の実施

テーマ4 重力観測による地殻流体挙動の解明

- 重力観測による流体圧変動モデルや流体移動モデルの特定への寄与

- ファイバ計測の活用

テーマ5 温泉成分による流体起源の調査

- 陰イオン濃度や水素・酸素同位体比の測定

テーマ6 活構造調査による長期間地殻変動の解明

- 地質調査による海成段丘面の離水年代の推定

- 変動地形解析による段丘面の傾動・撓曲の抽出

テーマ7 強震観測による被害状況の調査

表1 7つのテーマの研究分担者

|   |  |
|---|--|
| テーマ1<br>蔵下 英司<br>酒井 慎一<br>飯高 隆<br>勝間田明男<br>岡田 知己<br>吉田 圭佑 | 東京大学地震研究所<br>東京大学大学院情報学環<br>東京大学大学院情報学環<br>富山大学学術研究部都市デザイン学系<br>東北大学大学院理学研究科<br>東北大学大学院理学研究科 |
| テーマ2<br>西村 卓也<br>太田 雄策<br>木下 陽平                           | 京都大学防災研究所<br>東北大学大学院理学研究科<br>筑波大学システム情報系   |
| テーマ3<br>吉村 令慧<br>後藤 忠徳<br>笠谷 貴史                           | 京都大学防災研究所<br>兵庫県立大学大学院理学研究科<br>海洋研究開発機構海洋機能利用部門  |
| テーマ4<br>田中 愛幸<br>宮澤 理稔                                    | 東京大学大学院理学研究科<br>京都大学防災研究所  |
| テーマ5<br>森下 知晃<br>鹿児島渉悟                                    | 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系<br>富山大学学術研究部理学系  |
| テーマ6<br>石山 達也<br>安江 健一<br>廣内 大助<br>松多 信尚                  | 東京大学地震研究所<br>富山大学学術研究部都市デザイン学系<br>信州大学学術研究院教育学系<br>岡山大学学術研究院教育学域                             |
| テーマ7<br>大堀 道広<br>村田 晶<br>岩田 知孝                            | 滋賀県立大学環境科学部<br>金沢大学理工研究域地球社会基盤学系<br>京都大学防災研究所  |

- 高震度生成メカニズムの解明

- 被害状況との対応調査

## 3. 研究成果の概要

### 3.1 陸域地震観測による群発地震発生メカニズムの解明

臨時テレメータ観測点と定常テレメータ観測点のデータを用いたS波偏向異方性解析で得たS波偏向異方性の空間分布から、異方性の卓越方向は概ね東西方向と南北方向に推定された。東西ないし北西-南東方向の異方性は、応力起源の異方性または構造性の異方性の可能性が考えられる。Hi-net 珠洲観測点でのS波偏向異方性については、顕著な時間変化は見られなかった。

地震波速度トモグラフィ解析から、震源域深部の



深さ18 kmに高Vp/Vs領域を確認した。この領域では周囲と比べてP波速度がやや大きく、対象領域には第三紀の火成岩が分布していることから、高Vp/Vs領域はマグマだまりの可能性があり、そこから放出された流体がこの群発地震活動に関わっていることが示唆される。これらの結果から、この地震活動は、比較的断層構造の発達した未熟な応力性の異方性が分布し、深部に流体を示唆する高いVp/Vsの領域が確認される南部より活動が開始し、その後、断層構造が発達している構造性の異方性が分布する北部での活動が活発となったと考えられる。

群発地震の精密震源決定およびS波反射面の解析から、群発地震中に、複数枚の断層構造を通して微小地震が深部から浅部に移動したことで、群発地震活動開始部付近の活動は、それ以降の地震に比べて局所的に深いところで発生し、近くに顕著なS波反射面が存在することを明らかにした (Yoshida et al., 2023)。このS波反射面は、流体の供給源を表している可能性がある。微小地震が活発に発生・移動していた断層面上で2022年M5.4地震が発生し、主として西側に破壊伝播したことを示した (Yoshida et al., 2023)。

定常観測点と臨時オフライン観測点のデータを用いて推定したモーメントテンソル解は東西圧縮の逆断層が卓越する特徴を示しており、広域応力場を反映していると考えられる。

稠密オフライン地震計アレイ観測で得られた地震波形記録では、明瞭なP波初動のあとに、地下深部からの反射波と思われる後続波を確認することができた。後続波が震源からP波で射出し反射面で反射したPxP波であり、反射面は水平であると仮定すると、反射面が15 kmから17 kmの深さに存在する可能性が示唆された。

### 3.2 測地観測による地殻変動の調査

GNSS解析では、定常観測点と本総合調査及び国土地理院によって設置された臨時観測点のデータにソフトバンク株式会社のGNSS観測点を加えた統合解析を行ない、2020年12月頃の地震活動が活発化した当初の地殻変動速度が大きく、その後は変動速度が漸減する傾向等の非定常地殻変動の時空間発展を明らかにした。地震活動と地殻変動の変化に基づき分割した4つの期間で変動源モデルを推定すると、2020年12月からの約3ヶ月間では、深さ15 km程度で水平に近い開口割れ目、それ以降の期間では南東傾斜の断層面における逆断層すべりと開口が同時に発生するモデルが推定された。変動源モデルと地震活動を合わせて解釈すると、活動開始当初に大量の流体が南側でバースト的な地震を誘発しながら、ほぼ鉛直方向に上昇したと考えられる。そして深さ約15 kmで既

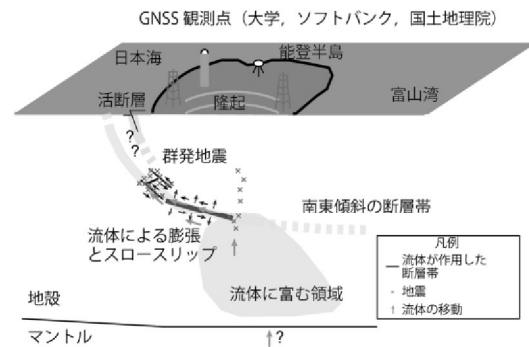


図-2 GNSS観測データから推定された能登半島北東部の群発地震のメカニズムの模式図。Nishimura et al. (2023) プレスリリース資料より引用。

存の南東傾斜の逆断層帯に到達し、透水性の高い断層帯沿いに拡散するとともに、非地震性の逆断層すべりを誘発した。これらの効果が合わさり、さらに浅部で長期に継続する大規模な群発地震活動を引き起こしたと考えられる (図2) (Nishimura et al., 2023)。

Sentinel-1 SARのInSAR解析により、群発地震活動に伴う地殻変動、2020年12月から2021年12月までの1年間で東西方向に最大1.5 cm、鉛直方向に最大2.0 cm程度の変位が認められた。矩形断層すべりモデルおよび球状膨張源モデルを仮定した変動源モデリングでは、球状膨張源モデルがInSARの変位を最も良く説明できた。

GNSS解析で推定された変動源モデルから計算される南東傾斜の逆断層に対するクーロン応力変化は、群発地震の活動域や珠洲沖セグメントを含む能登沖の海底活断層などの周辺領域において増加が示唆される。一方、時間変化について既存のモデルでは、地殻変動速度の漸減にもかかわらず、地震活動がほぼ定常的に継続する傾向を説明することが困難であることが分かった。

### 3.3 電磁気観測による地下電気比抵抗構造の解明

2021年度に実施した陸上32か所の広帯域MT観測から推定された比抵抗構造モデルの空間分解能や深部の構造推定精度を向上させるため、本総合調査では、珠洲市沖3ヶ所での海底MT観測と陸域25か所での広帯域MT観測を実施した (写真1)。参照磁場として、海底MT観測に対しては京都大学防災研究所宿毛観測室の磁場データ、陸上広帯域MT観測に対しては宮崎県宮崎市に臨時点を設け、概ね全ての補充観測点において良質なMT応答を得ることができた。計60ヶ所のデータ中、陸上55点のデータを用いた3次



写真-1 電磁気観測装置の設置の様子。

元比抵抗構造逆解析では、予察的な結果として、地震活動域周辺及びその下部に推定されていた顕著な低比抵抗領域は、その境界が明瞭になり、特に北・東クラスタは低比抵抗領域の縁辺部に震源が集中する様相が確認できた。

2022年12月から長期連続観測を地震活動域周辺の計6ヶ所において開始した。各観測点のデータに含まれる人工ノイズについての検討を進め、以後1年程度の長期観測を継続可能な観測体制を構築した。

### 3.4 重力観測による地殻流体挙動の解明

本総合調査の観測として、2023年3月上旬に重力観測を実施した。このときの重力値から2022年3月中旬に実施した重力観測時の重力値を差し引くことにより、約1年の期間に生じた重力値の時空間変化を算出した。その結果、群発地震活動が活発で、大きな隆起速度が観測されている珠洲市北部で重力が数 $\mu$ Gal減少し、地震活動域からの距離が大きい輪島では有意な重力値の変化が生じなかったことが分かった。これらの変化はGNSS観測から推定された変動源モデル (Nishimura et al., 2023) に基づく重力値の変化と概ね一致し、今後の変動の蓄積と重力観測の継続により貫入物質の密度が明らかになる可能性がある。

のと鉄道の廃線となった春日トンネル (珠洲市) の壁面に、約76mの光ファイバケーブルを敷設し、光ファイバ歪み計を用いて、歪みの高精度測定を開始した。地震の記録に関しては、並行観測している地震計の記録と同レベルかそれ以下の分解能で信号を捉えていた。長期間にわたる歪みの変化は、温度による影響が大きかった。また、能登町から珠洲市までの間のNTT西日本の光ケーブル約27.6kmを利用し、分布型音響センシングによる振動測定を行った。地震によるこの区間の揺れの広がりや、ケーブル沿いに約5m間隔、5000か所以上で捉えることができた。



写真-2 温泉水のサンプリングの様子。

### 3.5 温泉成分測定による流体起源の調査

地震活動域周辺の8地点の温泉・地下水 (内5地点は月1回程度の定点観測) で試料採取を行い (写真2)、陰イオン濃度 ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) 及び酸素・水素同位体比を測定し、定点観測地点においては2022年6月から2023年2月の期間におけるそれらの時間変動を求めた。2022年9月末に複数地点において陰イオン濃度の変動が認められ、その変動傾向が地点により異なるため、天水の混入ではなく、地殻流体の影響を反映した可能性が考えられる。酸素・水素同位体比も変動を示す地点があり、異なる起源を持つ地殻流体の混合の可能性が考えられる。また、能登半島に広く分布する日本海形成に關与した第三紀の火山岩類の調査を行い、代表的な試料の収集と日本海形成火成活動初期の精密な年代測定を行った。

### 3.6 活構造調査による長期間地殻変動の解明

小池・町田 (2001) においてMIS5eとされた折戸地点 (標高約87 m) にて、ローム層からAT (29 ka)、シルト層からK-Tz (95 ka; 町田・新井, 2003) の火山灰を検出した。ローム層の厚さ・風化度、K-Tzの層位から判断すると、MIS5eの可能性が高い。また、MIS9とされた高屋地点 (標高約168 m) にて、ローム層からAT (29 ka; 町田・新井, 2003) およびK-Tz (95 ka) の火山灰を検出した。ローム層の堆積速度一定と仮定すると、ローム層の基底は約249 kaと外挿され、MIS7eの可能性が考えられる。これらの結果と段丘面の分布高度から、両地点の隆起速度は0.7 mm/yr以上の可能性がある。

能登半島北東部の活構造については、禄剛崎～飯田湾にかけて、最終間氷期およびそれ以前の海成段丘面に、低断層崖・傾動 (逆向きが主体)・向斜状変形が新たに認められた。海成段丘面の局所的な変形は、富山トラフ西縁から沿岸にかけて分布する海底活断層による長期間地殻変動の可能性もある。

### 3.7 強震観測による被害状況の調査

高震度生成メカニズムの解明では、K-NET正院および被害状況との対応調査における強震観測点及びボーリング柱状図が存在する地点において微動アレイ観測を実施し、深さ数10mまでのS波速度構造を推定した。地質ボーリング情報や表層地質情報を参考にすると、当該地域の工学的基盤は珪藻質泥岩層であり、その上に砂礫、泥の沖積層で構成される浅部地盤であると考えられる。この工学的基盤面での速度コントラストの大きさが、地震動増幅に大きく寄与していることが分かった。また、各地点の探查結果から、これらの沖積層厚は空間的に不均質であることが分かった。K-NET正院で得られた浅部地盤モデルからは、周波数約1 Hzの地震動増幅を示しており、観測事実と整合している。また、被害状況との対応調査での臨時強震観測で見られる卓越周波数や空間的变化に対応する結果が得られた。

被害状況との対応調査では、2022年6月19日の地震で全壊となるような建物はなかったが、ブロック塀が倒れるなどの被害が散見した。被害が多く見られた珠洲市飯田、直、正院地区において、被害分布マップを作成した。これらの地区の被害分布は1993年能登半島沖地震の被害分布と似た特徴を示した。春日神社の大鳥居の倒壊は表層地盤による地震動増幅に加え、脚部の根入れ不足・強度不足も関係していたと見られる。

2022年6月19日の地震で被害が生じた珠洲市平野部の6地点で臨時強震観測（観測開始日は7月2日）を実施し、地震動特性を分析した。KSG（春日神社）では1~2 Hzおよび2~3 Hz付近に振幅のピークが見られる一方、KMN（K-NET正院近傍）では1.0~1.3 Hz付近にピークが見られるなど、観測点により卓越周波数特性の違いがあった。臨時強震観測で得られた観測地震動のKMN（K-NET正院近傍）の計測震度相当値（1.3~4.2）に対する各地点の平均震度増分は、ISK002が+0.16、SIKが+0.15、SKNが+0.06、KSGが-0.02、KFKが-0.09、NNEが-0.1となり大きな差は見られなかった。より高震度における違いの有無の検討が必要であり、余震記録における臨時強震観測点とISK002とのスペクトル比を用いて、より高震度であったと考えられる本震時の震度推定などを進める必要がある。

#### 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（例えば、京都大学、2022；石川テレビ、2022）。また、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。さらに、2023年6月4日に珠洲市のラポルトすず大ホールにて、能登半島北東部において継続する地震活動に関する総合調査の成果報告シンポジウム「地震活動研究の最前線と地震・津波への備え」（珠洲市共催、金沢地方気象台後援）を開催し、一般市民約120名の参加があった。また、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」やEarth, Planets, and Space 誌において Special Issue が企画されている。

#### 5. おわりに

本総合調査を通じて、能登半島北東部での地震活動や非定常地殻変動は地殻深部に存在する流体によって引き起こされていることが地震観測や測地観測、電磁気観測等により明らかになってきた。この流体が何であるかという点は未解決であり、さらなる研究の進展が待たれる。2022年のM5.4の地震の被害が目立つ地区における被害分布は1993年能登半島沖地震の被害分布と似た特徴をもち、浅部地盤構造と対応することが示された。能登半島北東部における地震活動や非定常地殻変動は本総合調査終了後においても継続しており、2023年5月5日にはM6.5（最大震度6強）の地震が発生した。これを受けて、現在、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」が実施されている。

#### 謝 辞

本総合調査は科学研究費助成事業（特別研究促進費）「能登半島北東部において継続する地震活動に関する総合調査」（22K19949）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、石川県、珠洲市、能登町、輪島市の行政や住民、民間企業等の方々にご協力頂きました。成果報告シンポジウムの実施にあたり、珠洲市から共催、金沢地方気象台から後援を頂きました。記して感謝します。

#### 参考文献

平松良浩（2022）：能登半島北東部（石川県珠洲市付近）での活発な地震活動，日本地震学会広報誌な

- ふる, 129, 6-7.
- 石川県災害対策本部, 2022, 6月19日~21日の能登地方を震源とする地震について(第20報), [https://www.pref.ishikawa.lg.jp/bousai/documents/0701\\_1200higaihou.pdf](https://www.pref.ishikawa.lg.jp/bousai/documents/0701_1200higaihou.pdf) (2023年8月26日閲覧).
- 石川テレビ (2022): 群発地震の原因か 石川・珠洲市地下に『流体』存在を確認 専門家「貴重な発見」, <https://www.youtube.com/watch?v=NLAk02ZVsPo> (2023年8月26日閲覧).
- 京都大学 (2022): 能登地方で継続する地震活動域およびその深部に電気を通しやすい領域を検出, <https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2022-10-24-1> (2023年8月26日閲覧)
- 町田洋・新井房夫 (2003): 新編火山灰アトラスー日本列島とその周辺, 東京大学出版会, 336 pp.
- 小池一之・町田 洋 (2001): 日本の海成段丘アトラス (小池一之・町田 洋編), CD-ROM 3 枚+付図2葉, 東京大学出版会, 122 pp.
- 西村卓也・平松良浩・太田雄策 (2022): 2020年12月頃から続く能登半島の群発地震と地殻変動, 地震ジャーナル, 74, 1-9.
- Nishimura, T., Hiramatsu, Y., Ohta, Y. (2023): Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan, *Sci. Rep.*, 13, 8381, <https://doi.org/10.1038/s41598-023-35459-z>.
- Yoshida, K., Uno, M., Matsuzawa, T., Yukutake, Y., Mukuhira, Y., Sato, H., Yoshida, T. (2023): 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, e2022JB026047, <https://doi.org/10.1029/2022JB026047>.

# 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。本報では本調査のこれまでの成果を概説する。

#### 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、56,000人以上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、各テーマでこれま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。

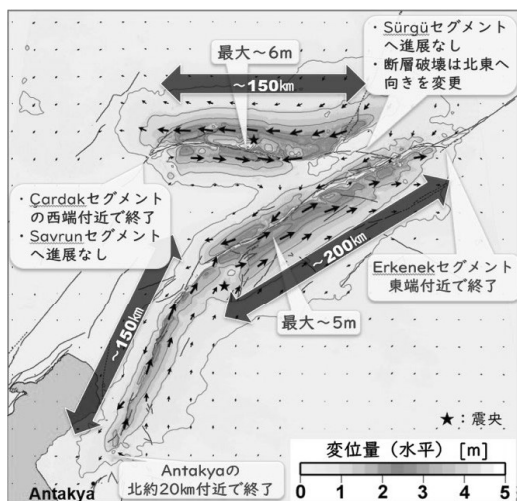


図-1 SARIにより捉えられた地殻変動分布図(水平成分). 等値線は0.5m間隔。青線は活断層を示す(Emre et al., 2013)

## 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-2)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、Mw 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る予定である。

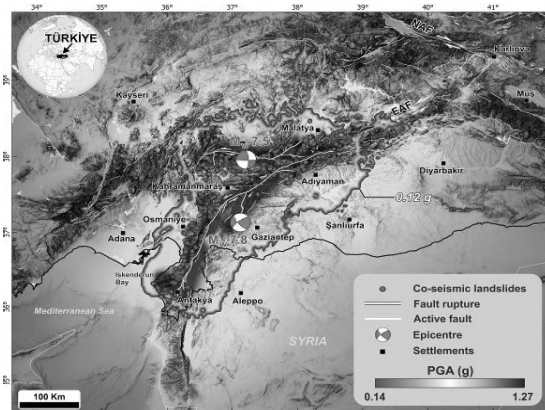


図-2 地震により発生した斜面災害分布図

## 2.3 建物被害判定 AI モデルの構築と評価

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

きた。この分析から得られた建物被害率の分布は、地震による表面最大加速度（PGA）の分布とも一致している。被害率の高い都市はPGAの大きい地域にある（図3）。

### 3. 地震発生機構の解明（加藤愛太郎先生）

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。

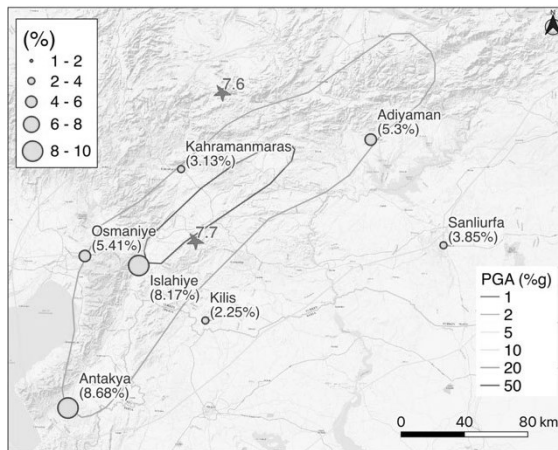


図-3 トルコ・シリア地震後の建物被害率の分布

#### 3.1 2023年トルコ南部の地震の震源過程

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

##### (1) Nurdağı-Pazarcık 地震（Mw7.9）

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

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と近い値を有するが、わずかに時計方向に回転しており、有意な非ダブルカップル成分をとる。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 $3.2 \times 10^{20}$  Nm（Mw 7.6）である。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 $90^\circ$  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 $61^\circ$  から $76^\circ$  と、やや北側に傾斜している。

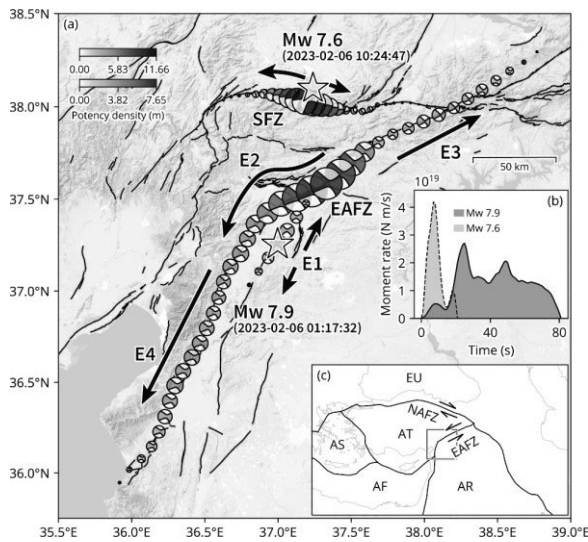


図-4 Mw 7.9 Nurdağ-Pazarçık地震とMw 7.6 Ekinözü地震のポテンシー密度テンソルインバージョンの解析結果（図は奥脇氏提供）。

### 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

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、余震分布の推定を行った。統合カタログの初期震源位置は観測網が相対的に充実しているAFADの発表位置を採用した。統合カタログを基に、tomoFDD (Zhang and Thurber, 2006)により、絶対走時と相対走時を両方利用した震源決定を実施した。速度構造は、Güvercin et al. (2022)による1次元構造を用いた。震源域が広範囲にわたるため、速度構造の水平方向の変化が想定される。その影響を軽減するため、理論走時と観測走時の走時差の平均値を観測点補正值として用いた。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、震源深さは、平均約6.5 kmとなり、主に0-10kmの範囲に集中している。AFADによる震源深さは多くが深さ7 kmに固定されており、相対的には若干浅めに再決定される傾向が見られる。

#### (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2日以内では、AFADカタログの約3倍以上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数は、Mw7.6の余震数に比べて少なく、ETASモデルによりp値を推定すると、1.3以上と大きめ目の値が得られた。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

震源域に比較的近い地震観測点の分布とUSGSによる震源分布との関係を調べ、小繰り返し地震の抽出に向けて準備をおこなった。観測点については、International Federation of Digital Seismograph Networks (FDSN)のシステムで比較的長期間（5年以上）観測を継続している観測点が複数あることを確認し、解析候補観測点として選ぶことができた。また、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。今後、このシステムの開発を進め、繰り返し地震の有無やそれと他の地震活動や本震のすべり分布との関係についての議論を進める予定である。

### 3.3 応力場の特徴

震源域の応力場の特徴を調べるために、Global CMT (GCMT)カタログ (Ekström et al., 2012)およびKOERI CMT カタログ (<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/moment-tensor-solutions/>)から、トルコ全域で過去に発生した地震のメカニズム解を取得した。GCMTカタログからは、1979年から2023年7月までに発生した648個の地震のメカニズム解を、KOERIカタログからは、2015年から2023年6月までに発生した359個の地震のメカニズム解を取得し重複する地震を除き、829個の地震データからなるデータ・セットを作成した。得られたカタログに、Yoshida et al. (2016)と同様の手順で応力インバージョン法を適用し、トルコ全域の応力場の空間変化を推定した。具体的には、研究対象領域全域に0.1°間隔でグリッド網を配置し、各グリッドにおける応力場の推定を行った。今後、応力場の空間分布の成因と、2023年Mw7.9とMw7.6地震発生過程について検討を行う予定である

### 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。大局的にはGNSSから推定される反時計回りの回転運動 (Weiss et al., 2020) に沿った北西—南東方向を示す観測点が多い。しかし、東アナトリア断層周辺では、南北に近い方向を指す観測点が少なく、アフリカプレートやアラビアプレートの北進の影響を強く受けている可能性がある。震源周辺では東西方向を示す観測点もあり、局所的な回転の場を形成しているように見える。

## 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。さらに、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、臨時強震観測の概要と得られた記録について説明する。

#### (2) 臨時強震観測

強震計の設置作業は、2023年3月15日から実施し、20日までに21地点に強震計を設置した。また、同年6月初旬に実施した強震記録の回収の機会に、さらに

1点をアンタキヤ地域に追加設置した。

図-5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)。アディヤマン県中心部では、図-6に示す4地点を設けた。カフラマンマラッシュ県では、図-7と8に示す東部のバ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。カフラマンマラッシュ県のバザルジック地区とアディヤマン市では、建物被害が多いが、強震観測点が少ないことを考慮した。一方、カフラマンマラッシュ都市圏の中心部には、図-8に示すように強震計も多く設置されている。しかし、同地域の南東部は、被害が多いにも関わらず、強震観測点が多く、臨時観測では南東部の3地点と基準点 (8) を設置した。震源断層南部のハタイ県の主要都市であるイスケンデルン地域とアンタキヤ地域は、地盤での増幅特性も大きいと考えられている地域である (Özmen et al. (2017; 山中, 2023)。図-9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5地点を設けた (図-10を参照)。そのうちの観測点19が南の丘陵地にある地点である。観測点17や22は、被害が厳しい地域にある。さらに、ハタイ県の南部のサマnder地域にも2点設置した。

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1gの最大加速度の揺れでも飽和しないために、2V/gの感度を持つ過減衰加速度計とした。また、バッテリーで2~3か月間連続データを記録することを考えて、各点ではカーバッテリー2台を電源として用いることにした。

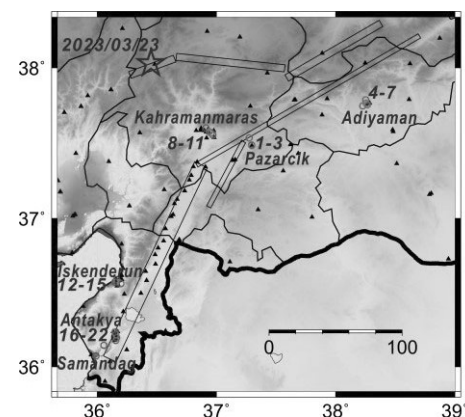


図-5 強震観測点の位置

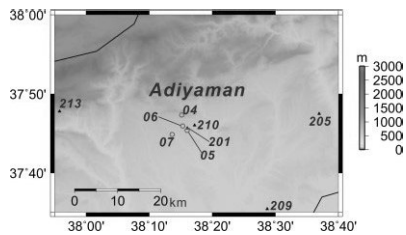


図-6 アディヤマン中心部の強震観測点（4：基準点）

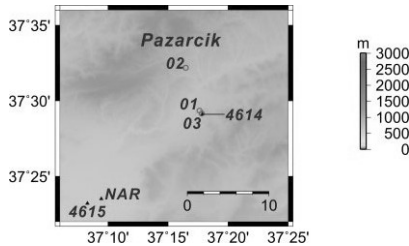


図-7 パザルジック地域の強震観測点（2：基準点）

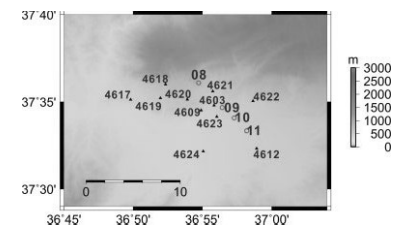


図-8 カフラマンマラッシュ中心部の強震観測点  
（8：基準点）

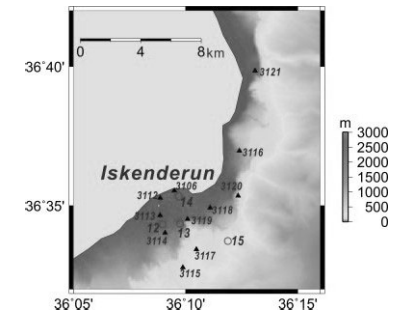


図-9 イスケンデルン地域の強震観測点（15：基準点）

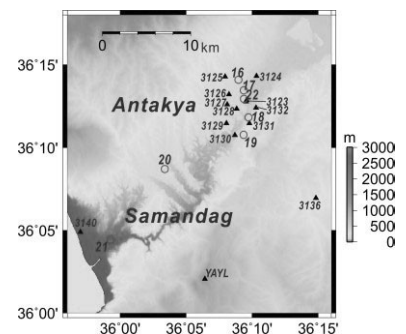


図-10 アンタキタおよびサマndaー地域の強震観測点（19，20：基準点）

### (3) 強震記録

本臨時観測による強震記録の例が図-11に示されている。ここでは、3月23日19時19分（UTC）に発生した地震（深さ13km, Mw5.3）を例にして説明する。震央の位置は、図-5の星で示されている。臨時観測

点は、震央距離数十km程度離れている。図-11上は、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加速度波形を図-11の下に示す。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。

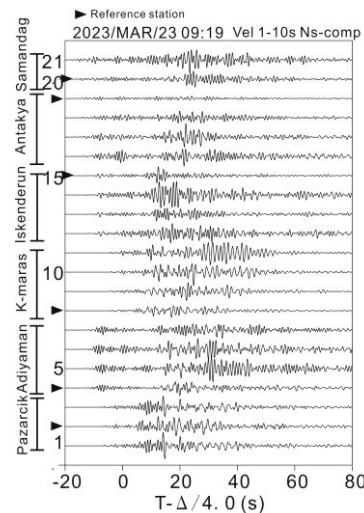
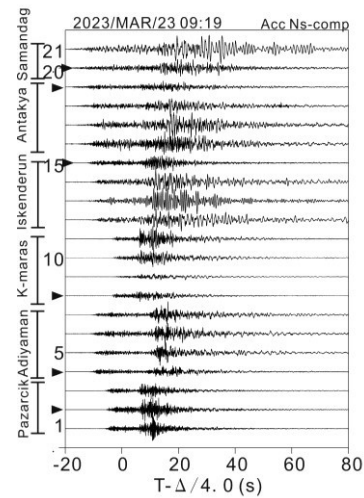


図-11 臨時観測点での観測記録の例  
2023年3月23日9時19分の地震による加速度記録  
（上）と周期1～10秒の帯域フィルター処理した加速度記録（下）

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-12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

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)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、サマンダーでは、周波数1Hz付近での比が極めて大きい。

各地点の加速度記録から計測震度を計算した。図-13に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。

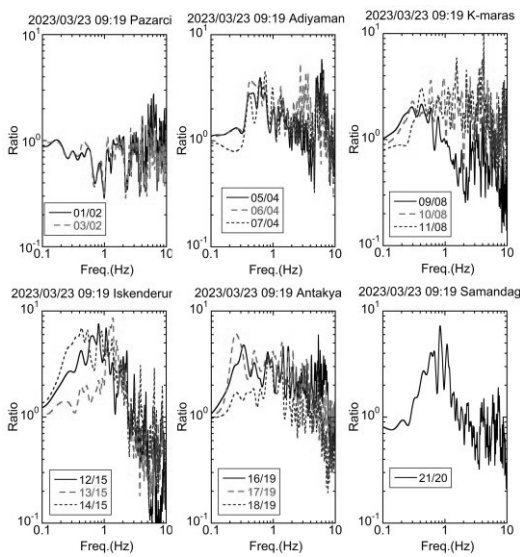


図-12の地震記録の水平成分のスペクトル比

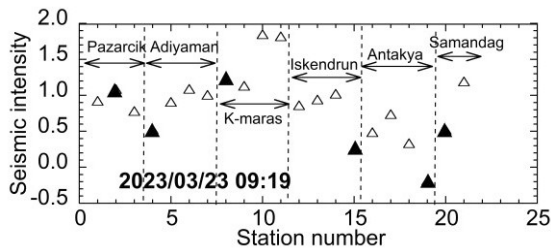


図-13 計測震度の分布

(4) おわりに

本研究では、2023年2月のトルコ南部の地震の被災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臨時強震観測を実施した。2023年3月中旬から6月までの約2.5か月間の連続記録を取得した。2023年9月まで本観測を継続する予定である。余震の際に得られた強震記録から、被災地域の地震動特性を明らかにした。パザルジック地域では被災地域の地盤特性は顕著ではないと考えられる。一方、その

ほかの地域では、被災地域での地盤による増幅の影響が大きい可能性が高い。今後、本研究による臨時観測点とAFADの強震観測点で得られた記録の分析を継続し、微動探査の結果と合わせて被災地域の地震動特性の特徴を明らかにする予定である。

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Islahye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-14)。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。

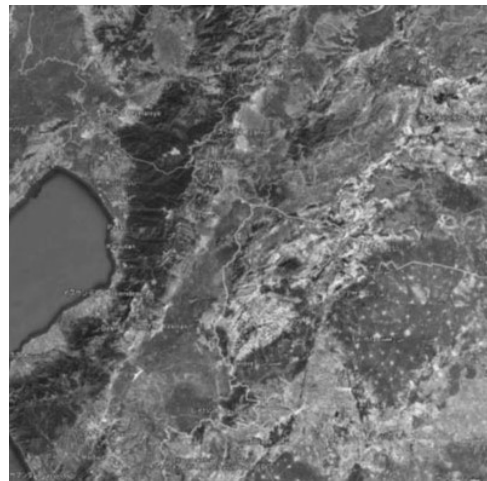
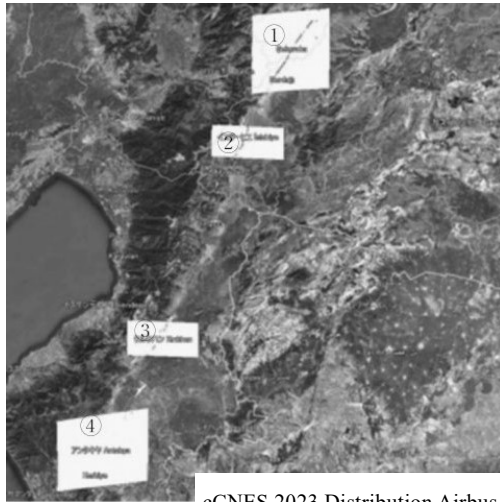


図-14 地表地震断層の位置

(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)

(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-15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。



cCNES 2023, Distribution Airbus DS

図-15 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) 判読結果の報告 (Sekeroba地区)

判読は、図-15に示した①Sekeroba地区(約61km<sup>2</sup>)から進めており、その暫定的な判読結果を表-2に示す。

表-2から、判読した建物棟数は、7,937棟で、このうち被害区分5の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建物は549棟、被害区分4は294棟、被害区分3は1,127棟である。また、各被害区分が全棟数に占める比率の名称を、被害区分5は倒壊率、被害区分4は大規模損壊率、被害区分3は一部損壊率とすると、倒壊率は7%、大規模損壊率は4%、一部損壊率は14%となっている。

表-2 被害区分別の棟数(暫定)

| 被害区分 | 棟数    | 比率   |
|------|-------|------|
| 1    | 5,967 | 75%  |
| 2    | 0     | 0%   |
| 3    | 1,127 | 14%  |
| 4    | 294   | 4%   |
| 5    | 549   | 7%   |
| 合計   | 7,937 | 100% |

被害区分5の建物ポイントと地表地震断層とをPleiades画像上に併せて表示し、図-16の被害区分5の分布図を作成した。

図-16から、被害区分5の建物の分布を見ると、地表地震断層に沿って連続して集中的に分布するエリアと地表地震断層から離れた市街地に広く分布するエリアがある。

この地表地震断層に沿って連続して集中的に分布するエリアについて、地表地震断層から水平距離別の倒壊率を算出し、表-3に示した。表-3から、地表地震断層から100m以内の倒壊率は11.1%であり、表-2に示した判読全体の倒壊率7%より大きい値となっている。



— 地表地震断層

● 被害区分5の建物ポイント

図-16 被害区分5の分布図(暫定)

表-3 地表地震断層からの水平距離別倒壊率

| 水平距離 (m) | 0～100 | 100～200 | 200～300 | 300～400 | 400～500 |
|----------|-------|---------|---------|---------|---------|
| 倒壊率      | 11.1% | 8.7%    | 5.5%    | 6.3%    | 3.8%    |

## (5) 今後について

今後、図-2で示した②Islahiye地区(約28 km<sup>2</sup>)、③Kirikhan地区(約28 km<sup>2</sup>)及び④Antakya地区(約54 km<sup>2</sup>)の判読を行い、4地区の判読結果から、地表地震断層と建物被害の関係を総合的に検討する予定である。

## 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、鋼造建物、組積造建物、免震・制振建物の被害概要調査
3. 病院・工場の事業継続に関する調査
4. 歴史建造物の被害調査
5. 地盤被害調査
6. トルコの建築関係の法令とその実態、および復興計画調査

### 5.1 RC造建物の被害状況

RC造建物の調査地域を図-17に示す。調査地域は1度目の地震の震源を中心として、その北東から南西へ350km超に及ぶ。すべての地域で甚大な被害が見受けられた。なお、トルコの耐震規定は、最近では、1999年、2007年、および2018年に改訂されている。

トルコの建物の特徴として、非常に扁平率の高い柱が用いられている事である。所要の曲げ強度を確保するため、特に1階の柱脚で配筋が多い。さらに、脚部で主筋が重ね継ぎ手されているため、主筋の空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った。2018年以降の建物では、全体崩壊形を形成したものの巢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。

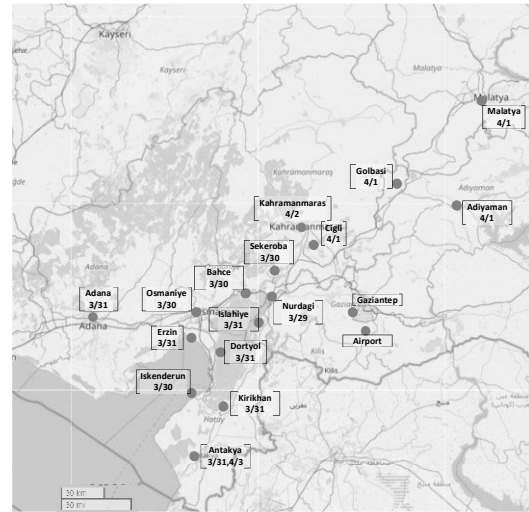


図-17 調査対象都市

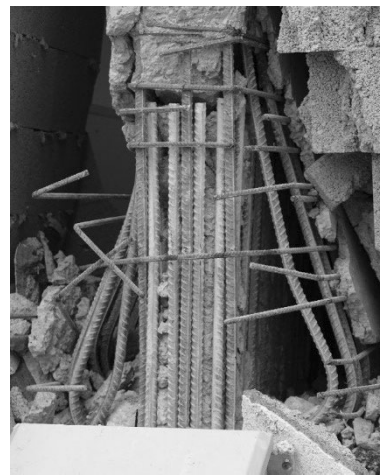


写真-1 柱脚重ね継ぎ手部 (Iskenderun)



写真-2 パンケーキ状に破壊した建物 (Antakya)

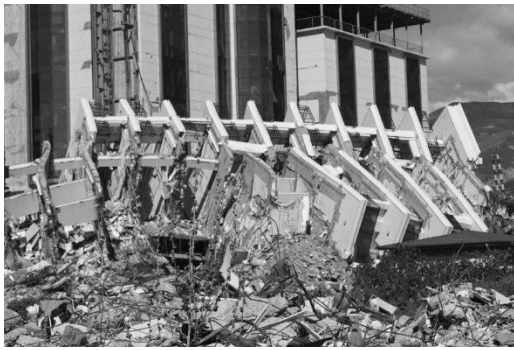


写真-3 転倒した建物（İskenderun）



写真5 13階建て集合住宅（Antakya）

## 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-18に各部材の被災度を示す。図には、1階のY4軸上の柱で計測した残留変形角も示している。X4-Y4柱で、南側に6.2%の残留変形角を生じていた。図からもわかるとおり、梁の被災状況が激しく、建物の被災度区分は大破となった。

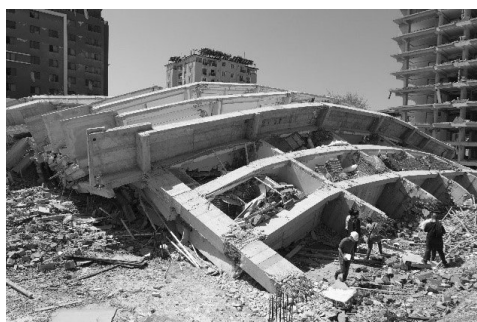


写真-4 13階建て集合住宅（Antakya）

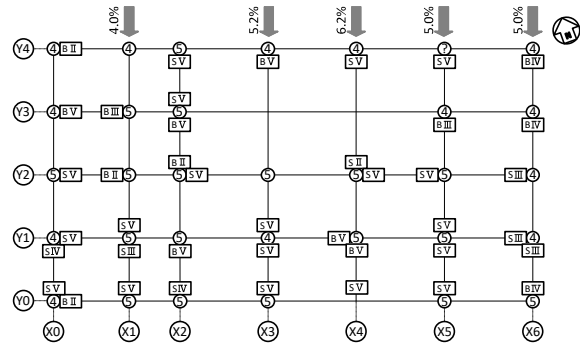


図-18 被災度判定結果（○は柱の被災度で曲げ、□は梁の被災度でB：曲げ、S：せん断）

## 5.3 免震建物の被害と工場・病院の事業継続性調査

ここでは、免震構造の病院とプレキャスト工場の被害について紹介する。

写真-6は Malatya に位置する、地下2階、地上7階建てRC造病院建物（2022年竣工）である。地下2階の柱頭に免震が配置されている。免震装置は写真-7のように転がり免震を採用している。周辺地盤等とのクリアランスはおおよそ1mであった。一方、転がり免震に残ったケガキ傷から推定すると、全振幅で18cm程変形したと推察される。被害はクリアランス部のカバーなど、非構造材に若干生じたが、既に修復済みであった。

写真-8は Kahramanmaraş にある、建設中の工場建物で、プレキャスト構造である。図-19に示すように、プレキャスト梁はコーベル上に設置され貫通ボルトで緊結されていた。一部ロングスパン部分では、梁にプレストレスが導入されていた。地震により、一部のプレキャストばりが落下していた。



写真-6 免震建物 (Malatya)

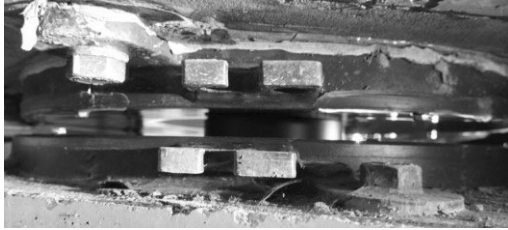


写真-7 転がり免震装置 (Malatya)



写真-8 建設中の工場建物 (Kahramanmaraş)

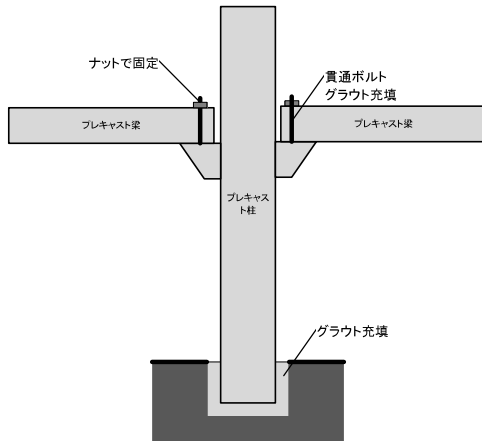


図-19 プレキャスト部材の接合方法

## 6. 災害調査による土木構造物被害の解明

### 6.1 橋梁の被害

トルコ南東部の被災地域における主要な道路ネットワークでは、地震発生直後から、う回路の設定や車線規制が行われた結果、完全に通行不能となった区間はMalatyaからGolbasiまでのみと限定的であった。ただし、被害程度に応じて通行可能、不可能を

判断する基準が日本とは異なるため、発生した被害が少ないことを必ずしも意味しない。実際に著者らが現地を確認した限り、何らかの損傷を受けているものの、速度制限や車線規制をすることなく通常通り供用されている橋は珍しくなかった。

写真-9はGaziantep県Nurdagi近郊の高架橋の橋台とデッキのジョイント部の損傷に対する復旧作業が行われている様子である。このような橋台とデッキのジョイント部、あるいはデッキとデッキのジョイント部の損傷は他にも複数の橋でも確認できた。



写真-9 橋台とデッキのジョイント部の損傷

写真-10はKahramanmaraş県Kahramanmaraşにおいて、桁の横ずれ防止ブロックが損傷した様子である。同様の被害も他の複数の橋で確認できた。なお、この橋には桁間をつなぐ横桁が設けられていなかった。このように横桁が設置されていないことは、トルコの橋に共通して見られる特徴であった。



写真-10 横ずれ防止ブロックの損傷

写真-11はHatay県Demiropuにおいて地盤の側方流動により橋台が傾斜した状況である。この橋台の傾斜によって、路面には大きな段差が生じていたものの、車両の通行は行われていた。この橋から100mほど離れた学校の校庭では噴砂が確認できた。

その他、道路橋の被害に関しては、Nurdagi近郊の

斜張橋のデッキの落下，Antakya郊外の5径間単純桁橋の橋脚の傾斜とデッキの落下を確認した。



写真-11 傾斜した橋台

## 6.2 断層との交差点での線状構造物の被害

この地震では，道路，鉄道やパイプラインといった線状構造物が，地表に出現した断層変位による影響を受けた。写真-12はKahramanmaras-Gaziantep道路のNarliからKahramanmarasに向かう間の盛土区間が断層変位に伴い約4mの横ずれを生じた地点で撮影したものである。この地点ではほぼ完全な横ずれ変位となっており，段差は生じていない。断層と道路の交差角度の関係から，ガードレールが引張力により引きちぎられた状況も確認できた。また，周囲の畑には，路面に現れたずれを延長する方向にずれの痕跡が残っていた。

写真-13はNarliにおいて確認した送電鉄塔の部材の座屈である。これは，左横ずれした断層と送電線の交差角度の関係から，断層変位に伴って送電線に引張力が作用したことが原因だと思われる。同様の被害はSekerobaでも見られ，こちらも断層変位と送電線の交差角度は，送電線に引張力が働くようになっていたことを確認した。

Gaziantep県Islahiyeでは埋設管（用途不明）が地表断層との交差点で座屈し，地表に出現した様子が見られた（写真-14）。これらの管は地表から数cmの深さに埋設されており，通常の埋設管に比べると地上側に変形が出やすい状況であったと考えられる。



写真-12 断層変位に伴う道路の横ずれ



写真-13 断層と送電線の交差により鉄塔に生じた部材座屈



写真-14 断層変位との交差点で座屈し地表に露出した埋設管（用途不明）

## 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-15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-15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。

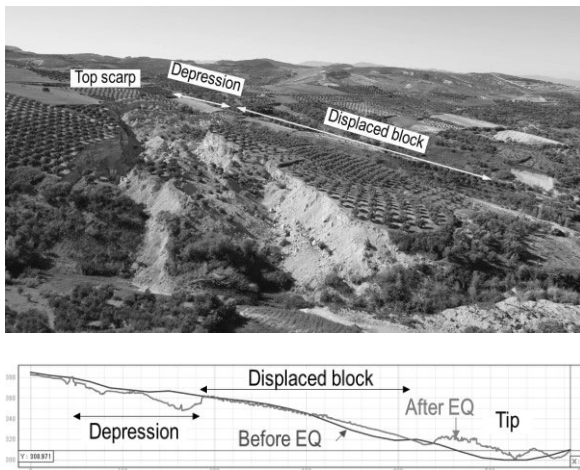


写真-15 Tepehan地すべりとUAV測量による主側線の地震前後の地表面標高

## 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 災害対応と被災者支援

#### (1) はじめに

トルコは1999年に北アナトリア断層を震源とするマルマラ地震で大きな被害を受けており、復興過程においては防災機能強化のための様々な取り組みが実施された。その一つが、各省に分散されていた防災機能の統合であり、2009年には首相府危機管理庁（AFAD）が設置された。今回の地震は、AFAD設置後に初めて経験する大規模広域地震災害であった。

本研究では、カフラマンマラシュ地震においてAFADによる災害対応がどのように行われたのか、4月15日~25日に実施した現地調査に基づき述べる。

#### (2) AFADによる災害対応

トルコ政府は、2009年に首相府緊急事態総局（TEMAD）、内務省市民防衛総局（GDCCD）、公共事業・住宅省地震総局（GDDA）を統合し、AFADを設置した。そして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（81県中。その後、非常事態宣言対象県はその後11県に拡大）。AFAD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）。

今回の調査においては被災県の災害対策センターにおいて支援業務に携わっていた職員から話を聞いた。被害が大きかったハタイ県の災害対策センターでは（写真-16）、被災者支援業務が「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た。



写真-16 ハタイ県災害対策センター

#### (3) 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名が避難していた（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-17）。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-17 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。

#### (4) おわりに

以上に述べたように、今回の地震災害においてAFADは中央レベルにおける政策決定のみならず、被災現場レベルにおいても多様な被災者支援を実施していた。災害対応は、全国の行政職員の支援を得て行われており、AFADと内務省により人的支援の調整が行われていた。被災者支援業務は細分化されており、被災者一人一人のニーズを確認したうえで支援は提供されていた。

ただし、地震発生直後は状況が混乱し、支援体制が整備されるまで数日要していた。また、中央政府による意思決定・指示に基づき対応が行われており、被災現場の担当はどのような経緯で意思決定が行われているのかを把握していない事例もみられた。

トルコの災害対応体制は中央集権的であり、市町村を中心とする地方分権的な日本の災害対応とは異なる。このような災害対応体制の違いが被災者支援の質や地域の復興にどのような影響をもたらすのか、今回の調査から得られた結果に基づきさらにさらに研究を進める予定である。

## 7.2 震災前後の情報リテラシーの変化について

### (1) はじめに

今回の大震災前にAFADは詳細な地震ハザードマップを作成していたが、被災地の市民の認識は地震対策への認識が十分ではなかった。ここでは、大震災前後の地方行政や学生を対象としたインタビュー等によりその要因と大震災前後の災害情報リテラシーの変化を調査する。この結果を、今後の防災教育等に活用することを目的として実施する。

### (2) 調査の概要

2023年10月上旬に被災において災害情報リテラシー調査を予定している。現地にはゲブゼ工科大学 Ceren准教授に同行いただきインタビュービュー等の実施し、大震災前後の災害情報リテラシーの変化を調査する。調査対象は被災地での地震対策や復旧作業を行っている地方行政ならびに情報リテラシーが高い大学生を想定している。

### (3) 事前情報収集

図-20にAFADの地震ハザードマップを示す。これまでAFADは1999年のコジャエリ地震（イズミット地震）を契機に詳細な地震ハザードマップを作成し、国民への周知を行ってきた。しかし、危惧される北アナトリア断層沿いの地震リスク（マルマラ地震）は多くのトルコ国民が認識しているものの、図1の東アナトリア断層沿いの地震リスクは十分には認識されていなかった。



今回の被災地域の市民は地震リスクを十分認識していなかった。その理由はこの地域で近年大きな被害地震は発生していなかった。

図-20トルキエの地震ハザードマップ

その結果、耐震化が進まず、多くの是弱な構造物がその理由の一つとして、図-212に示すように被災地域では近年大きな被害を出すような地震が発生していなかったことが挙げられる。

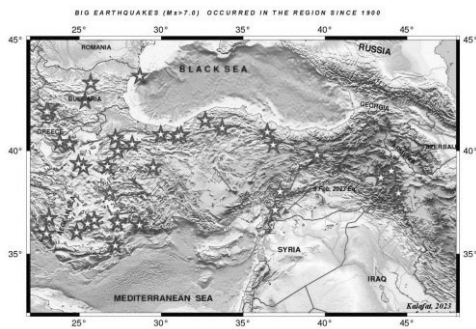


図-21 過去の被害地震

### (3) 期待される成果

本研究により過去に被害地震が少ない地域におけるハザードマップ等による災害情報リテラシーの状況ならびに大震災後の変化を知ることにより、今後のトルコにおける災害情報リテラシー向上の迅速化を図ることが期待される。特に危惧される北アナトリア断層沿いの地震（マルマラ地震）への対応はトルコ最大級の地震防災課題であることから、災害情報リテラシー向上と耐震化の推進は必要不可欠である。

## 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」のこれまでの成果を概説した。本年度末には、各テーマは次の内容で研究成果を取りまとめる予定である。

「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」による世界で最も優れた解像度の衛星画像を用いて、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、本震のみならず続発した大地震に関する地震発生場の理解を進める。特に、震源過程解析と地震活動解析による結果を包括的に解釈することで、一連の地震活動の発生過程を明らかにする。また、応力場・地震活動・震源破壊過程・地殻変動の解明、流体の関与の理解等、複雑な断層系における総合的な学術成果を創出する。

「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する。また、広大な地域で大きな揺れが生じたメカニズムを

解明し、わが国の同等あるいはそれ以上の規模の地震災害対策に生かせる知見を得る。

「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解明する。また、建物の被害を調査し、無被害の建物についても、なぜ被害がなかったのかを明らかにし、日本の耐震に生かせる知見を得る。さらに、日本では事例の少ない断層変位や地すべり、液状化等の地盤変位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する。そして、今回の地震の科学的知見と地震への対策の重要性について、トルコの人々に伝える防災教育に国際的な視点から取り組み、未来に向けた災害に強い地域づくりに向けた活動を行う。

## 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 (Disaster and Emergency Management Presidency), 1990. National Seismic Network of Turkey (DDA). International Federation of Digital Seismograph Networks. <http://tdvm.afad.gov.tr/>.
- AFAD, Press Bulletin-36 about the Earthquake in Kahramanmaraş, 01.03.20
- Bianchi, I., Park, J., Piana Agostinetti, N. and Levin, V. (2010): Mapping seismic anisotropy using harmonic decomposition of receiver functions: An application to Northern Apennines, Italy, *J. Geophys. Res.*, **115**, B12317, doi: 10.1029/2009JB007061.
- Ekström, G., M. Nettles, and A. M. Dziewonski (2012): The global CMT project 2004-2010: Centroid-moment tensors for 13,017 earthquakes, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **200-201**, 1-9.
- 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.

Görüm, T., Tanyas, H., Karabacak, F., Yılmaz, A., Girgin, S., Allstadt, K., Süzen, M.L., Burgi, P. (2023): Preliminary insight into the co-seismic landslides and surface 1 deformations triggered by the February 6, 2023 Türkiye-Syria earthquake sequence (draft under review)

Government of Türkiye (2023) Türkiye Earthquakes Recovery and Reconstruction Assessment.

Güvercin, S. E., Karabulut, H., Konca, A. Ö., Doğan, U., & Ergintav, S. (2022): Active seismotectonics of the East Anatolian Fault. *Geophysical Journal International*, 230(1), pp. 50-69.

KOERI, Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Bosphorus Univ., 2001. Boğaziçi University Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute. <https://doi.org/10.7914/SN/KO>.

Okuwaki, R., Yagi, Y., Taymaz, T., Hicks, S. P. (2023): Multi-scale rupture growth with alternating directions in a complex fault network during the 2023 south-eastern Türkiye and Syria earthquake doublet. *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 50, e2023GL103480.

Reitman et al. (2023) : Preliminary fault rupture mapping of the 2023 M7.8 and M7.5 Türkiye Earthquakes (<https://doi.org/10.5066/P985I7U2>)

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*, in press.

Yoshida, K., Pulido, N. & Fukuyama, E. (2016): Unusual stress rotations within the Philippines possibly caused by slip heterogeneity along the Philippine fault. *J Geophys Res Solid Earth* 121, 2020–2036.

Zhang, H., and Thurber, C. (2006): Development and Applications of Double-difference Seismic Tomography. *Pure and Applied Geophysics*, 163(2-3), pp. 373-403.

門馬直一・藤原広行・中村洋光・佐伯琢磨・内藤昌平・下村博之・山田哲也：平成28年熊本地震における地表地震断層近傍の建物被害、2019年地震工学会大会梗概集

金田義行：SATREPSにおける地震防災分野の国際協力—SATREPS トゥルキエの研究概要—  
日本地震工学会誌 第48号 P9-12 2023

## 謝 辞

本地震で亡くなられた方々に弔意を、また被災された方々にお見舞いを表します。

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

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

本調査の一部は、日本建築学会、土木学会、地盤工学会、日本地震工学会の調査団と共同で実施したものです。本調査においては、KOERIデータの取得・整理においてDogan Kalafat博士、AFAD・Tatar教授、中東工科大学・Albayrak氏、は森伸一郎先生（愛媛大学）、小山真紀先生（岐阜大学）、村上ひとみ先生（山口大学）、Nurcan Meral Özel先生（ボアジチ大学）、Dilek 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年トルコ・カフラマンマラシュ地震における 強震観測地点での地震動と構造物被害状況

森 伸一郎\*・Gulten Polat\*\*・大里 重人\*\*\*・千葉 達朗\*\*\*\*・  
Nurcan Meral Özel\*\*\*\*\*

\* 愛媛大学

\*\* Yeditepe大学

\*\*\* 株式会社土質リサーチ

\*\*\*\* アジア航測株式会社

\*\*\*\*\* Boğaziçi大学

## 要 旨

2023年2月6日トルコ南東部のKahramanmaraş（カフラマンマラシュ）県に震源を持つ2つの地震が起きた。東アナトリア断層に沿うMw=7.7のPazarcık（パザルジク）本震とその後北方でMw=7.6のElbistan地震が起きて、広範囲にわたり甚大な被害が生じた。これらの地震では多地点で強震観測記録が得られ、近年の設計基準地震動に匹敵するか上回るような大振幅の強震動となった。また、断層近傍の地点で明瞭なパルス波が見られた。地震動と構造物被害の関係に焦点を当てて、3月と4月に現地調査を実施し、強震観測地点周辺での構造物被害の状況を観察し、それに基づいてMM震度を判定した。被害判定に基づく震度は計算震度より下回る場合が多い。

## 1. はじめに

2023年2月6日トルコ南東部のKahramanmaraş（カフラマンマラシュ）県に震源を持つ2つの地震が起きた。現地時間の4時17分に、東アナトリア断層に沿うMw=7.7のPazarcık（パザルジク）本震が起き、その約9時間後13時24分に北方でMw=7.6のElbistan地震が起きて、広範囲にわたり甚大な被害が生じた。これら2地震はKahramanmaraş地震と呼ばれている（トルコ政府）。トルコでの観測史上最大級の2つの地震により、強い地震動が発生して東アナトリア断層に沿う地域とシリア北部に甚大な被害をもたらされた。3月6日時点でのトルコ政府発表のデータによれば、犠牲者の数は47,000人を超え、建物被害は約52万棟とトルコ史上最大のものとなった。

これらの地震ではトルコ政府内務省AFADにより整備運用されていた地震観測ネットワークの多数の地点で強震観測記録が得られ、近年の設計基準地震動に匹敵するか上回るような大振幅の強震動となった（METU）。断層近傍の観測地点では震源断層か

ら射出されたと解釈できるような明瞭なパルス波が見られた。そこで、地震動と構造物被害の関係に焦点を当てて、第1著者は3月、4月、8月の3度にわたり第2著者または第4著者とともに現地調査を実施し、強震観測地点周辺での構造物被害の状況を観察するとともに微動観測を実施した。3月は全域の各種構造物被害の全貌把握に焦点を当てた被害調査と地震計と被害集中域での微動観測を実施した。4月は橋梁の被害に重きを置き、同様の調査を行った。8月は同様の微動観測を中心として現地調査を実施した。本報告では、3月・4月の調査結果を扱い、微動観測については述べない。

## 2. 地震動と構造物被害

### 2.1 概要

#### (1) 地震動

地震直後の地震動の逆解析からはKahramanmaraş地震の震源から東アナトリア断層帯を北西に延びる方向での断層運動が注目されたが、震源からHatay県



表-1 各地の観測点における地震計周辺の地震動の大きさ（JMA 計測震度，推定 MM 震度，PGA，PGV）

| 地震計 No.      | 地震計地名                 | JMA 計測震度      | MMI 震度       | PGA cm/s <sup>2</sup> | PGV cm/s | 現地調査                | 微動測定         | 震度判定               |
|--------------|-----------------------|---------------|--------------|-----------------------|----------|---------------------|--------------|--------------------|
| Seismo meter | Location              | JMA intensity | MM intensity |                       |          | Field damage survey | Micro-tremor | 3月，4月の現地調査による暫定的判定 |
| 2703         | Gaziantep             | 4.6           | VIII         | 165.1                 | 15.8     | ○                   |              | VII-VIII           |
| 201          | Adiyaman              | 5.5           | XI           | 879.9                 | 41.9     | ○                   | ○            | VIII-X             |
| 213          | Tut                   | 5.5           | IX           | 291.3                 | 82.7     |                     |              |                    |
| 4615         | Narli, West           | 6.2           | XI           | 664.2                 | 134.3    | ○                   | ○            | VIII-X             |
| NAR          | Narli, East           | 5.8           | X            | 784.6                 | 97.1     | ○                   | ○            | VIII-IX            |
| 4620         | Kahramanmaras         | 5.0           | IX           | 320.9                 | 34.2     | ○                   | ○            | VIII-X             |
| 4624         | Kahramanmaras AP west | 5.7           | X            | 357.6                 | 57.9     | ○                   | ○            | VIII               |
| 4616         | Turkoglu              | 5.9           | X            | 652.8                 | 93.3     | ○                   | ○            | IX-XI              |
| 2712         | Nurdagi               | 6.1           | X            | 602.7                 | 108.6    | ○                   | ○            | IX-XI              |
| 2708         | Fevtipasa             | 6.3           | XII          | 1787.9                | 145.7    | ○                   | ○            | VIII-X             |
| 2718         | Islahiye              | 6.0           | XI           | 702.4                 | 108.2    | ○                   | ○            | IX-XI              |
| 3138         | Hassa                 | 6.7           | XII          | 1296.3                | 197.3    | ○                   | ○            | IX-X               |
| 3137         | Hassa village         | 5.8           | XI           | 848.0                 | 76.3     |                     |              |                    |
| 3145         | Balarmudu             | 6.2           | XI           | 696.4                 | 142.2    | ○                   | ○            | VIII-X             |
| 3139         | Guzelce               | 6.2           | X            | 577.1                 | 152.5    |                     |              |                    |
| 3142         | Kirkhan               | 5.9           | XI           | 749.5                 | 79.5     | ○                   | ○            | X-XI               |
| 3141         | Serinyol              | 6.2           | XI           | 961.1                 | 125.5    | ○                   | ○            | IX-X               |
| 3123         | Antakya west          | 6.3           | XI           | 867.6                 | 186.2    | ○                   | ○            | X-XI               |
| 3124         | Antakya west          | 6.3           | X            | 658.3                 | 110.2    | ○                   | ○            | IX-X               |
| 3125         | Antakya west          | 5.9           | XI           | 1121.9                | 94.0     | ○                   | ○            | VIII-IX            |
| 3126         | Antakya west          | 6.2           | XI           | 1211.0                | 78.7     | ○                   | ○            | VIII-IX            |
| 3129         | Antakya west          | 6.5           | XII          | 1353.0                | 170.8    |                     |              |                    |
| 3131         | Antakya east          | 5.8           | X            | 366.1                 | 49.2     |                     |              |                    |
| 3132         | Antakya east          | 6.1           | X            | 515.3                 | 67.5     |                     |              |                    |
| 3134         | Dortyol               | 5.3           | IX           | 246.1                 | 35.7     |                     |              |                    |
| 3135         | Arsuz                 | 6.3           | XII          | 1372.1                | 71.4     |                     |              |                    |
| 3136         | Altinozu              | 5.7           | X            | 402.0                 | 52.8     |                     |              |                    |

現地調査に際しては、AFADとの連絡を取り、JICAの協力を得て、森とPolatは3月3日から3月7日まで現地調査を実施した。現地調査は、Gaziantep, Kahramanmaraş, Hatay, Adiyamanの各県におけるAFAD地震計設置点とその市町の被害集中域で微動測定と建物被害観察を実施した。また、移動する道路と地表地震断層（事前にUSGSにより読み取られていたものと現地で判断できたもの）との交差点では、道路被害と構造物被害の有無と状況を確認した。地表地震断層の観察、地震計周辺の建物被害分布の把握、倒壊を免れた被害建物の詳細観察に、構造物点検用の衝突自動回避する性能を有する500g未満の軽量小型ドローンを使用した。使用については事前に申請して、トルコの法律に基づいて、一定の条件下では操作規制のないトルコ人が操作し、操作補助を

第1著者が行った。

### (3) 構造物被害状況に基づく震度推定

構造物や地盤の被害状況からJMA震度で4以上、MM震度でVI以上では、震度階が推定できる。一方、地震動記録があれば、JMA計測震度は3成分加速度波形よりフィルター操作などの決められた手順を経て計算できる。また、MM震度は、最大加速度（PGA）や最大速度（PGV）などとの単純な変換式がさまざまに提案されている。ここでは、M. Bilal and A. Askan (BSSA, 2014)のPGAを用いる式(1)によるものとした。

$$MMI=0.287+3.625 \log(PGA) \quad (1)$$

表-1に各地の観測点における地震計周辺の地震動の大きさ（JMA計測震度，推定MM震度，PGA，PGV）

を示す。また、建物被害や構造物・地盤被害状況から判定した地震計設置都市集落の判定MM震度を示す。この表は、4月調査終了時点での中間結果であり、今後修正される可能性がある。JMA計測震度や推定MM震度の値から想定される被害状況に比べて、どちらかと言えば被害率は低いところが多いと判断している。すなわち、現地被害調査に基づく震度判定は、PGAから算出されるMM震度よりも小さい。しかし、前述したようにG2やG3に対応する被害認識が異なる可能性もあり、被害率にG2やG3を含めるのか否かに関して詳しく述べたものが少ない。EMS-98のような構造種別ごとに行った定量評価に基づいた震度判定を基礎にする必要がある。

## 2.2 各地の被害

### (1) Adiyaman

Adiyaman(アドゥヤマン)では、4月に調査した際、倒壊した建物はほとんど解体・除去されており、解体・除去されてがれきが残る更地と致命的な被害を免れた建物が混在する状況がいたるところに見られた。写真-1に崩壊建物解体と耐えた建物の事例を示す。東西に走る幹線道路沿いにある写真の10階建て住宅は、全ての階で壁が被害を生じており、下層ほど被害程度が大きくなり、1・2階の壁の多くが崩れ落ち、RCの柱・梁が露出している。EMS98の被害レベルはGrade-3である。しかしながら、写真-2に1階を拡大したものを示すが、柱・梁にはひび割れなどの



写真-1 崩壊建物解体と地震に耐えた建物の事例



写真-2 地震に耐えた建物の1・2階の壁

構造的損傷は見られず、中空レンガ積造充填内壁がせん断破壊して、面外方向の揺れにより破壊片が落下するという被害形態である。一方、この建物の右側敷地には、倒壊した同程度の高さの住宅のがれきと杭の鉄筋(丸鋼φ12mm)が残っており、コンクリート片は脆く粗悪なものであった。したがって、ぜい弱な建物が選択的に倒壊したと推察される。

### (2) Gaziantep

Gaziantep(ガジアンテップ)市では、地元の人によれば、Şehitkamil(シェヒットカミル)地区の2つの街区で高層住宅がパンケーキ倒壊したという。1つは、Ataturk(アタチュルク)街区の6棟セットの9階建てアパート(15年前建設と近所の人の話)が全て崩壊した現場。解体されて、何も残っていなかった。基礎も全て除去されていた。周辺の7階、12階の建物に顕著な被害は認められなかった。

もう一つはBatikent(バトゥケント)街区の少し離れた2棟である。写真-3に崩壊した9階建てRC造アパートを示す。1階を拡大したものを示す9階建てのツインタワーだが、一方のみがパンケーキ状倒壊した。残った方は、内側から観察できた柱・壁については被害がなかった。パンケーキ状に倒壊して残っていた柱・梁・壁のコンクリートは砂状の塊のところもあり一部で脆いものがあった。写真-4に1階柱の破壊断面を示す。鉄筋は丸鋼で、隅柱は主鉄筋(φ18mm, 15mm混在)の量が十分であったが、せん断補強筋が細くて本数が少なく、端部は90度フックであった。



写真-3 崩壊した9階建てRC造アパート



写真-4 1階柱の破壊断面





写真-5 Nurdağı 市中心部 3月4日状況



写真-6 Nurdağı 市中心部 4月19日の状況



写真-7 地震計 NAR



写真-8 NAR 丘陵から望む Narlı 西地区

鉄筋・コンクリートともに不適切なものと判断した。なお、トルコでは、業者を違えて発注することが普通のようなので、建設業者が異なっていた可能性がある。その他の建物は、外観からの損傷は認識できず無被害もしくは軽微な被害であると思われる。したがって、ぜい弱な建物が選択的に倒壊したと推察される。

### (3) Nurdağı

Nurdağı（ヌルダグ）市では、市の中心部が壊滅的な被害を受けた。写真-5は3月4日の市中心部の道路沿いの被害状況である。左の2階建物は中空ブロック積みの壁で支持されているのに対して右の建物は中空レンガ積みの壁で充填された、極めて細い柱・梁によるRC造である。いずれも2階建てであるが、1階が倒壊していた。写真-6は4月19日における中心部の状況である。パンケーキ状倒壊を多く含む倒壊建物や倒壊寸前の建物が多かった領域であったが、解体・撤去されていて、元の建物などは分からない状態であった。残留している建物は、壁などの部材は被害を受けているが、柱・梁の主要構造にはひびが入っておらず、被害レベルはGrade-3である。

### (4) Narlı

Narlı（ナルル）では、平地を挟み西の地区（4615）と東の丘陵地区（NAR）の両方にAFAD地震計がある。それぞれ、JMA計測震度で6.2と5.8であり、震度6強と6弱であり、日本でも被害が発生するレベルである。写真-7は地震計NARであり、丘陵の頂上にある。観測小屋の前に微動計（QS）が見える。観測小



写真-9 地震計 4615 周辺の住宅地の様子

屋の左側の近くに通信鉄塔があり、この鉄塔の振動の影響の有無が気になる。ここからは、西の地区が遠望できる。写真-8にNAR丘陵から望むNarlı西地区を示す。間にあるNarlı平野を横断する無舗装道路（白っぽく見える）が直交する地表地震断層により約4mの左横ずれが確認できる。西の地区には1～2階建ての住家が密集しているが、視認できる損傷は見つけられない。

AFAD地震計4615とその前で微動観測を行った際にこの敷地にあるRC造の倉庫の壁には、大きな亀裂が入り水平ずれが生じていた。写真-9はこの地震計の周辺の様子を示す。1～2階建て（多くは2階建て）の比較的新しい住家が円環状に配置された住宅地である。調査の日（3月6日）にはまだ、多くの人が歩道などにテントを張って自主的に避難生活をしていた。外観観察からでは、住家には軽微な被害が認められるものもあったが、多くは無被害に見えた。

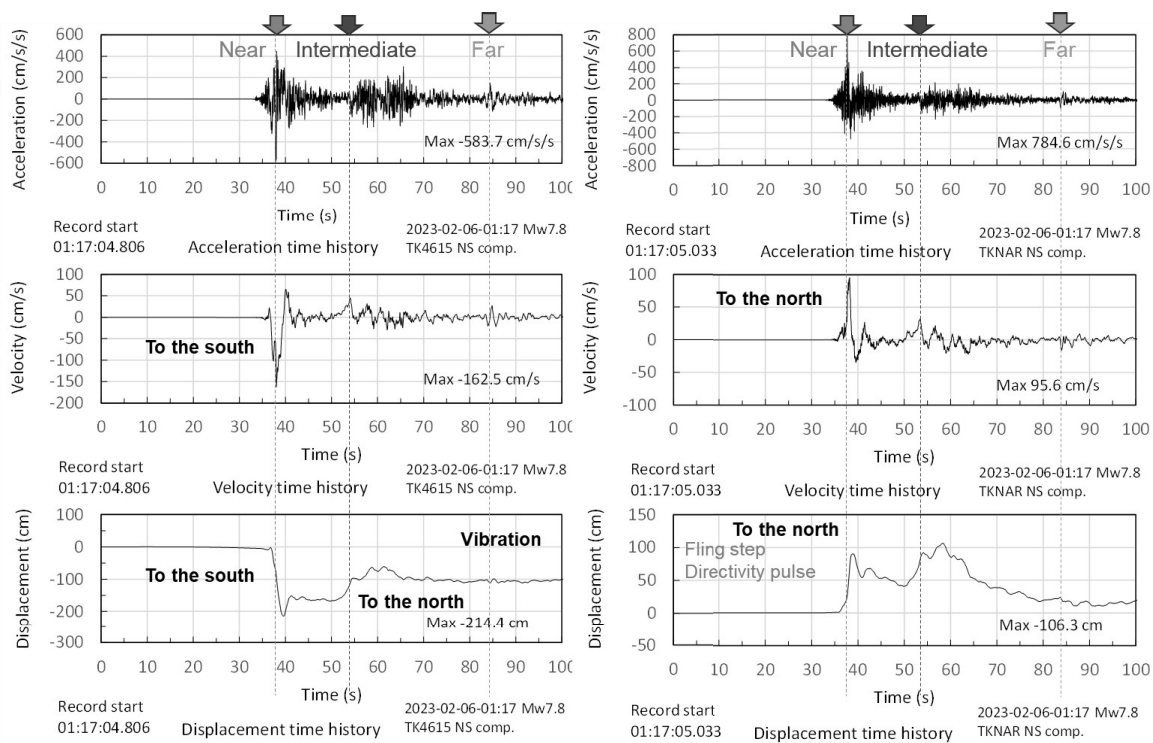


図-4 Narlı における 4615 地点と NAR 地点の地震動 (NS 成分) の加速度・速度・変位の時刻歴

図-4に、Mw7.7本震の際のNarlıにおける4615地点とNAR地点の地震動 (NS成分) の加速度・速度・変位の時刻歴を示す。最大加速度はそれぞれスパイク状のピーク値であり、 $-584\text{cm/s}^2$ 、 $785\text{cm/s}^2$ と言う大振幅であり、その後も $200\text{--}300\text{cm/s}^2$ は何度も超えており、構造物への影響が大きく、被害発生レベルである。しかし、前述のように被害は軽微であった。

さて、2回積分は、階段状の1段階のステップ関数で基線がずれるとのモデル (大原ら, 2008) を用いて、基線ずれ時刻とずれ量の2つを求めて、時刻歴直接積分によって計算した。速度波形と変位波形で、西側の4615が南に、東側のNARが北に動いたことがよくわかる。38秒付近の速度波形は明瞭な片方向に振幅の大きなパルス波形を呈し、PGVは $-163\text{cm/s}$ 、 $96\text{cm/s}$ と大きな値となっている。それに対応して、変位波形には明瞭なFling step波形が現れ、最大で $-214\text{cm}$ と $106\text{cm}$ であり、差し引き $320\text{cm}$ の動的食い違い変位が現れている。地表断層で見られた $3\text{m}$ 余のずれ変位はFling step変位の残留したものと理解することができそうである。また、加速度波形には明瞭に54秒あたりから始まる2回目の大振幅群が認められ、対応して速度・変位の波形にも振幅は小さいが別のFling step波が認められる。これらは最初の方が観測点近傍の断層運動、2番目が観測点からやや離れた断層運動によるパルス波であると考えられる。すなわち、どこかの地点では、これらの2つの破壊によるFling step波のdirectivity効果が重なったパルス波が生成される可能性があることを示唆している。

#### (5) Islahiye

Islahiye (イスラヒエ) では住宅などが密集する地域から南に離れたところに、ある小学校の敷地にAFAD地震計TK2718がある。JMA計測震度で6.0 (6強)、MM震度でXIと最大級である。写真-10にRC造5階建ての小学校舎を示す。軽微な被害であった。組石造充填内壁 (MIW) やRC骨組みとの間にクラックが入る程度の被害であり、構造部材となる柱はほぼ



写真-10 Islahiye RC5階建て小学校舎 (AFAD2718)



写真-11 校舎北西隅柱周辺の鉄筋の座屈



写真-12 Antakya 市西側で倒壊率が高い領域



写真-13 倒壊寸前の5階建てRC造建物



写真-14 パンケーキ倒壊した7階建てRC造住宅



写真-15 倒壊建物の柱・梁の接合部

全て無被害である。ほとんどの柱は下端の打ち継ぎ目も開いていない。写真-11に校舎北西隅柱周辺の鉄筋の座屈を示す。柱の最下端と基礎梁上端の継ぎ目で鉄筋が伸びて座屈してはらみ出しているのが確認できた。コンクリートにもクラックが生じている。TK2718の波形分析によれば、南北方向では、北側に大振幅で周期の長いFling Step波が認められており、

## (6) Antakya

Antakya (アンタキヤ) 市は、今回の地震で最も被害の大きな市である。市の中心を流れるOrontes川(オロンテス, Asi川とも言う)を境に、東の左岸側が旧市街で低層建物が多く、被害率は低いものに対して、西の右岸側が新市街で高層建物が多く、また被害率も高い。個々の建物の耐震性の違いもあろうが、高さの違いで被害率が異なることから、それぞれの固有振動数に影響の大きい成分の強さの違いが現れたものとの仮説を立てるのが有効である。写真-12は、川に近い西側でも最も倒壊率が高い領域で、倒壊や倒壊寸前と言った致命的な被害を受けた建物が解体され、がれきが残っている様子である。AFAD地震計TK3123に近い。JMA計測震度6.3, MM震度XI, PGA868cm/s<sup>2</sup>, PGV186cm/sを記録している。また、後ろに見える3棟の建物のように倒壊しなくても壁だけが大きく被害を受けたものも多い。

写真-13は倒壊寸前の5階建てRC造建物である。緊急解体が必要なレベルの被害であることは間違いない。しかし、基礎が被害を受けて上部構造が不等沈下しているのに、各層の梁が大きく変形しながらも

柱と組んで、自重を支えている。柱梁の接合部の配筋が良いのとコンクリート品質が良いためにRC部材の持つ粘り強さを発揮しているとみることができる。このように倒壊しないと、生存空間を維持できるため、死傷者を大幅に減らすことができる。

写真-14はパンケーキ状倒壊した7階建てRC造住宅である。ベランダの片持ち床版と飾り垂れ壁が重なって見える。折れて開きが出るように壊れている部分のほとんどは鉄筋が繋がっていない。この建物で柱・梁の部分を探して観察した。写真-15は倒壊建物の柱・梁の接合部である。接合部で破壊しており、破壊面に見えるコンクリートが極めて脆く、セメント分が不足しているように思われる。また、鉄筋は丸鋼で細く少ない。

## 2.3 Antakya市の被害集中

Antakya (アンタキヤ) 市では被害集中的に発生しているとのメディア報道があった。現地調査前の衛星画像分析(HOTOSM)による被害状況に基づき、以下の見解を有していた。アンタキヤ市全体で被害が発生しているわけではなく、建物倒壊被害はオロンテス川の西岸で带状に集中しており、西岸に多い6~10階建てのRC造に被害が多く、東岸に多い低層家屋には被害は少ない。

地震動については、最大加速度(PGA)は地表地震断層の延長線上の西岸の西側丘陵部で大きく、波形にはパルス波が見られ、ディレクティブティー効果



図-5 Antakya 市における Grade-5 と Grade-4 の被害に絞り込んだ建物被害マッピングの結果

だと思われる波形も見られると解釈していた。

しかし、建物被害は西側の丘陵地で発生しており、被害集中域は河岸段丘崖に位置すると解釈し、地盤のVs30モデル (H. B. Okay, A. A. Özacar, 2023) との比較から、Vs30の高低などでは被害集中は説明しにくいと思われた。Vs30モデルは地下構造の推測の参照になる。

そのほか、大局的には深い地盤構造として、ハタイ地溝帯による陥没構造の可能性もある。もしも、そのような構造があれば、地溝帯陥没構造の内部に位置している可能性があり、その盆地構造に影響さ

れ、西側の盆地端部に起因するエッジ効果 (川瀬, 1996) が現れた可能性がある。

以上の仮説は、まず建物倒壊被害が帯状に集中しているのかどうかである。そこで、Google Earthで公開されている衛星写真では、Antakya市周辺は頻繁に更新されていた。遅い時期のものでは、解体・除去・整地が一目瞭然であるが、前述したように、Grade-3でも解体しているのが現地の実態なので、Grade-4とGrade-5に絞って分布を知る必要がある。そこで、震災直後の衛星画像を用いて、被害判別を行った (第1著者)。図-5にGrade-5とGrade-4の被害に絞り込んだ

建物被害マッピングの結果を示す。3月時点での衛星画像分析 (HOTOSM) の結果では細長い帯状に現れたが、この被害判別では、市の北側では細い帯状であるが、中心部については、楕円状になった。この被害集中域の外側にも塊となって解体・除去エリアがあるが、それは、現地での一部の確認から、Grade-3程度の被害である可能性が高い。したがって、Antakya市における被害集中原因を解明する意義は高いと思われる。

### 3. まとめ

地震動と構造物被害の関係に焦点を当てて、3月と4月に現地調査を実施し、強震観測地点周辺での構造物被害の状況を観察し、それに基づいてMM震度を判定した。被害判定に基づく震度は計算震度より下回る場合が多い。

今後は、地震計周辺の被害率を求め震度判定を行い、地震記録から得られるJMA計測震度との関係を明らかにすること、地震計と被害集中域での微動観測によって被害集中域でのJMA計測震度と被害率と周りの関係を明らかにすること、これらを併せて被害率からJMA計測震度を求められるようにすること、MM震度への換算方法を考案することが残された課題である。

### 謝 辞

本稿は、本研究における現地調査に当たり、多くの方々にご支援・ご協力をいただきました。3月の現地調査では、京都大学防災研究所自然災害研究協議会には調査旅費助成を戴きました。また、トルコ国災害緊急事態管理庁 (AFAD) には貴重なデータ提供で、同地震リスク低減部門のGeneral ManagerのOrhan Tatar博士からは現地調査許可を戴くのにお世話になりました。東北大学災害科学国際研究所の特任教授の竹谷公男先生およびJICA地球環境部防災グループの皆様には地震直後での現地調査に対して様々なご支援を戴きました。山口大学非常勤講師の村上ひとみ先生には、様々なご支援ご協力を戴き、4月の調査に同行して戴きました。芙蓉コンサルタントの故・大野二郎様、須賀幸一様、SkydioのTom Moss様、JIWの柴田巧様には、調査に当たり調査機材などでご支援戴きました。CODE海外災害援助市民センター事務局長の吉椿雅道様には、地震直後2月以降のアドゥヤマン (Adiyaman) の被災実況を教えてくださいました。4月の現地調査は、科学研究費助成事業 (特別研究促進費) 「2023年トルコ南部の地震と災害に関する総合調査」として実施しました。兵庫県立大

学教授の阪本真由美先生とBoğaziçi大学Technical ExpertのDilek Kepekçi様にはこの4月現地調査に同行していただきました。ここに記して深く謝意を表します。

### 参考文献

- 大原 光世, 森 伸一郎, 門田 慶史: 2008年岩手・宮城内陸地震における地震記録から求めた永久変位, 地盤工学会四国支部技術研究発表会講演概要集, pp.73-74, 2008.9.
- 川島 一彦, 渡邊 学歩: 斜橋における落橋防止構造の有効性に関する研究, 土木学会論文集, No.675/I-55, 141-159, 2001. [https://doi.org/10.2208/jscej.2001.675\\_141](https://doi.org/10.2208/jscej.2001.675_141)
- 森 伸一郎, 大里 重人, 千葉 達朗: 2023年2月6日トルコ・シリア地震の地震動と被害状況 インターネットから得られる情報に基づく地震動と構造物被害状況の予備的な工学的分析, 2023年2月6日トルコ・シリア地震緊急報告会 (オンライン公開), 松山, 2023.3.1.
- 森 伸一郎, 大里 重人, 千葉 達朗, Nurcan M. Özel, Gülten Polat: 2023年トルコ・シリア地震の現地調査速報, 2023年トルコ・シリア地震現地調査速報会 (オンライン公開), 松山, 2023.3.15.
- 森 伸一郎, 大里 重人, 千葉 達朗, Nurcan M. Özel, Gülten Polat: 2023年2月トルコ・カフラマンマラシユ地震における各地の地震動と構造物被害, 日本地球惑星科学連合2023年大会 (JpGU-2023), U-1309, 2023.5.
- AFAD: TADAS (Turkish Accelerometric Database and Analysis System), 2023.2.7-2023.2.21(Downloaded). <https://tadas.afad.gov.tr/event-detail/15499>
- European Seismological Commission: European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98), 1998. [https://media.gfz-potsdam.de/gfz/sec26/resources/documents/PDF/EMS-98\\_Original\\_englisch.pdf](https://media.gfz-potsdam.de/gfz/sec26/resources/documents/PDF/EMS-98_Original_englisch.pdf)
- Government of Türkiye: Türkiye earthquakes recovery and reconstruction assessment, 27 Mar 2023, <https://reliefweb.int/report/turkiye/turkiye-earthquakes-recovery-and-reconstruction-assessment>
- Middle East Technical University: Preliminary Reconnaissance Report on February 6, 2023, Pazarcık Mw=7.7 and Elbistan Mw=7.6, Kahramanmaraş - Türkiye Earthquakes, [https://eerc.metu.edu.tr/en/system/files/documents/DMAM\\_Report\\_2023\\_Kahramanmaraş-Pazarcık\\_and\\_Elbi stan\\_Earthquakes\\_Report\\_final\\_ENG.pdf](https://eerc.metu.edu.tr/en/system/files/documents/DMAM_Report_2023_Kahramanmaraş-Pazarcık_and_Elbi stan_Earthquakes_Report_final_ENG.pdf)
- Mustafa Biral (METU修士論文,2013)

USGS: Turkey Earthquake Emergency Response,  
Surface rupture lines, 2023.2.19, revised 2023.3.15.  
(Down-load-ed)<https://usgs.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=5229bb842bd64b688d769abbe43b46>  
人道支援 OpenStreetMap チーム: HOTOSM Turkey  
Destroyed Buildings (OpenStreetMap Export),  
[https://data.humdata.org/dataset/hotosm\\_tur\\_destroyed\\_buildings?fbclid=IwAR1Iu8ceLbEDAQhp95vMevj5UGINufknpmmVL6rdLzZkkRb8mhp0\\_wLqP0I](https://data.humdata.org/dataset/hotosm_tur_destroyed_buildings?fbclid=IwAR1Iu8ceLbEDAQhp95vMevj5UGINufknpmmVL6rdLzZkkRb8mhp0_wLqP0I)

Middle East Technical University: Preliminary  
Recon-naissance Report on February 6, 2023, Pazarcık  
Mw=7.7 and Elbistan Mw=7.6,  
Kahramanmaraş-Türkiye Earth-quakes, REPORT NO:  
METU/EERC 2023-01, 2023.  
2023 Turkey Earthquakes - Building Damage Assessment  
Map

# 過去の白黒災害写真とそのカラー化された写真の印象に関する比較調査

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、どちらが現実感を抱きやすいのか、どちらが恐怖感を抱きやすいのかについて小学生、中学生、成人を対象にアンケート調査を行った。カラー化写真は現実感を与えるには良い方法であると示唆されたが、恐怖感については小・中学生対象であれば白黒の方が被災の恐ろしさが伝わる可能性があることが分かった。対象年齢や目的に合わせて白黒、カラーを使い分けることが重要と示唆された。

## 1. はじめに

近年の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。治水事業の効果も相まって、長年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、事前防災教育や啓蒙が必要となってくる。特に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。ところで、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が報告されている。

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白黒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。その第一段階としてアンケート調査により白黒写真をカラー化した写真と元の白黒写真の印象の違いについて検討を行った。

## 2. 調査概要

### 2.1 カラー化サイト

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。それぞれのサイトのURLは参考文献に示しておく。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。

### 2.2 対象河川流域と災害事例

本研究では山口県の一級河川である佐波川流域で発生した災害を対象としてアンケート調査を実施した。佐波川は山口県と島根県の県境にある三ツヶ峰に源流があり、山間溪谷部を流れ、野谷川、三谷川、

表-1 佐波川流域で発生した災害事例

|   |   |
|---|---|
| 1 | 大正7年(1918年)7月, 死者不明、流潰家屋91戸、浸水家屋3,451戸(台風性豪雨)                       |
| 2 | 昭和16年(1941年)7月, 死者不明、流潰家屋3戸、浸水家屋150戸(前線系豪雨)                         |
| 3 | 昭和26年(1951年)7月, 死者不明、流潰家屋1,083戸、浸水家屋3,397戸(前線系豪雨)                   |
| 4 | 昭和35年(1960年)7月, 死者不明、流潰家屋9戸、浸水家屋869戸(前線系豪雨)                         |
| 5 | 昭和47年(1972年)7月, 死者5名、流潰家屋58戸、床上浸水83戸、床下浸水428戸(前線系豪雨)                |
| 6 | 平成21年(2009年)7月, 死者19名(土砂災害)、流潰家屋69戸、床上浸水69戸、床下浸水302戸(前線系豪雨、土砂災害が主体) |

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 |

島地川等の支川と合流し山口県防府市市街を流れ周防灘に注ぐ。幹線流路長56km, 流域面積460km<sup>2</sup>である。流域は山口県のほぼ中央に位置し, 防府市, 山口市, 周南市の3市にまたがっている。流域内人口は約30,000人である。土地利用は山地が93%, 農地が6%, 市街地が1%である。想定される氾濫域の面積および人口は防府市街地を中心に58km<sup>2</sup>, 約80,000人である。

佐波川流域で大正時代以降に発生した代表的な水害事例を表-1に示す。上記6事例の内, 台風によるものが1件, 残りが梅雨前線系である。流潰家屋数から判断すると1951年7月の災害がこの中でも最も甚大な災害であったと思われる。この時の豪雨は西日本で広域に渡って甚大な被害をもたらしている。2009年の災害では河川氾濫による被害は発生していないが, 土砂災害が多発した。防府市は佐波川沿川を中心に「石原」, 「谷尻」, 「砂」, 「岩留」, 「川尻」, 「流田」, 「砂走り」, 「河原」等の洪水に由来する地名が多くみられる。過去に幾度となく洪水被害が発生したことが伺われる(佐古(2011))。

### 2.3 アンケート調査概要

表-2にアンケート調査実施状況を示す。No.6の被験者についてその属性を記しておく。99名の被験者

のうち55名は防災イベントに参加した一般の方々である。残りの44名は防災イベントでブースを出した方々で山口河川行動事務所職員31名, 防府市役所職員6名, 消防署職員6名, 職業は不明であるが防災士の資格を持った方が1名である。これらの方々には防災に関連する仕事を行っている方あるいは防災に関する知識がある方と解釈でき防災関係者とここでは呼んでおく。

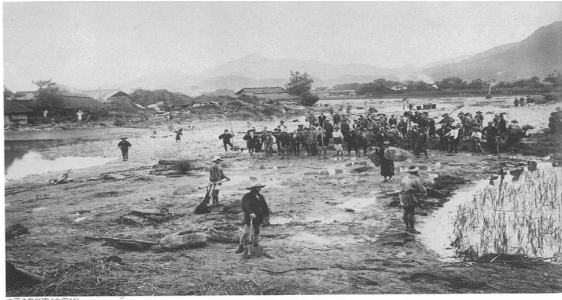
No.1およびNo.2は2021年度に実施したもので, No.3~6は2022年度に実施したものである, アンケートは元画像とそのカラー化画像を並べて表示して, 表-3に示している質問とその回答を選択して頂いた。選択枝は5つである。質問項目が少なく単純なのは小学生が回答し易くしているためである。

No.1, No.3およびNo.5は教室または会議室であったためスクリーンに元画像とカラー化画像を投影してアンケート調査を行った。No.2はgoogle formを利用してオンラインでアンケート調査を行った。No.6は屋外であるため元画像とカラー化画像を印刷したアンケート用紙を配布してアンケート調査を行った。アンケート調査で用いた過去の災害写真は、大正7年7月水害と昭和26年7月水害を撮影したもので、4種類ある。ここでは紙面の都合上2種類だけを写真-1およ



表-3 アンケート質問項目と選択枝

|      |   |
|------|---|
| 質問 1 | どちらの写真に現実感がありますか？                           |
| 質問 2 | どちらの写真が怖いですか？                               |
| 回答   | 白黒, どちらかと言えば白黒, 白黒もカラーも同じ, どちらかと言えばカラー, カラー |



(a) 元画像



(b) カラー化画像 (Image Colorizer でカラー化)

写真-1 Case1 大正 7 年 (1918 年) 7 月の災害 右田村



(a) 元画像



(b) カラー化画像 (Data Chef でカラー化)

写真-2 Case2 昭和 26 年 (1951 年) 7 月の災害 防府市上右田・本橋上流地区

び写真-2に示す。写真-1は大正7年7月災害で写真-2は昭和26年7月災害である。それぞれ左が元の白黒写真, 右がカラー化された写真である。なお, 紙媒体の論文集は白黒印刷されるが京都大学学術情報リポジトリではカラーのPDFで公開される。

最初の調査日から (2021年12月20日) を基準とすると写真-1は103年前, 写真-2は70年前でいずれも撮影者が不明のため著作権は切れている。

### 3. 調査結果

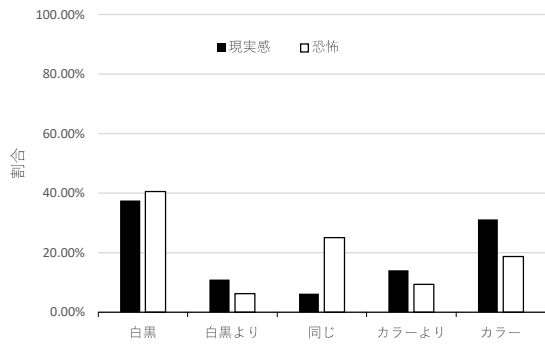
#### 3.1 Case1の結果

この章ではこの2枚の写真についてカラー化された写真と元の白黒写真の印象の違いについてアンケート結果を述べる。新田小学校の結果において有効回答数は64である。黒色のバーが現実感, 白色のバーが恐怖感の回答割合である。以下のすべての図面で同様である。現実感については最も多い回答は白黒で37.5% (24件) であった。次に多かった回答はカラーで31.25% (20件) であった。回答が白黒とカ

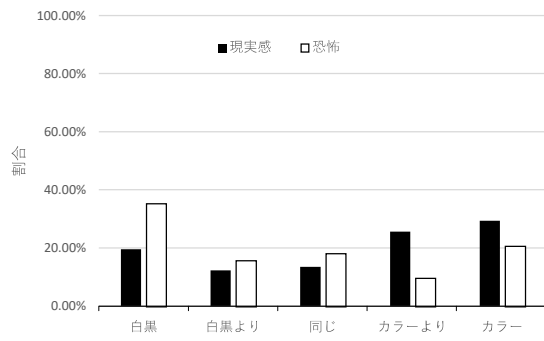
ラーに二分される結果となった。恐怖感については最も多い回答が白黒 (40.63%, 26件) で次に多かったのが白黒もカラーも同じ (25.00%, 16件) である。3番目がカラー (18.75%, 12件) であった。現実感では回答が二分されていたが, 恐怖感では白黒ともカラーとも判断がつきにくい回答を含めて三分されている結果となった。回答数としては現実感, 恐怖感とも白黒が最も多い。

佐波中学校の有効回答数は82である。現実感について最も多い回答はカラー (29.27%, 24件) で, ついでどちらかと言えばカラー (25.61%, 21件), 白黒 (19.51%, 16件) となっている。際立って回答が集中している選択枝はない。恐怖感では白黒が (35.37%, 29件) 最も多く, 次にカラー (20.73%, 17件) となっている。白黒とどちらかと言えば白黒を合わせると51.22%となり白黒に半数程度は白黒に恐怖心を感じている。

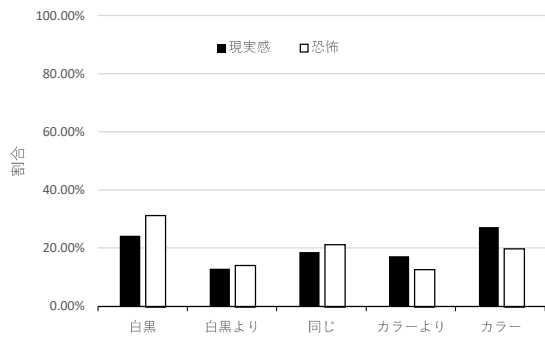
右田小学校の有効回答数は70である。現実感についてはカラー (27.4%, 19件) が白黒 (24.29%, 17件) となっている。白黒とカラーに回答が集まっている。恐怖感では白黒が (31.43%, 22件) 最も多く,



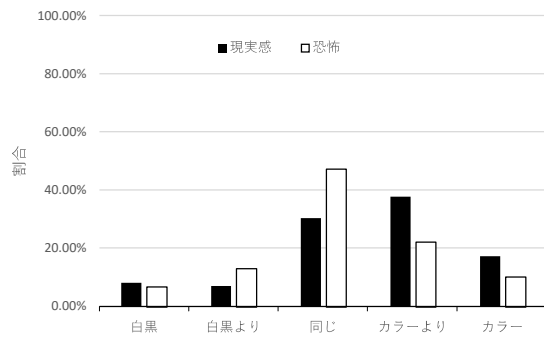
(a) 新田小学校 5 年生の結果 (N=64)



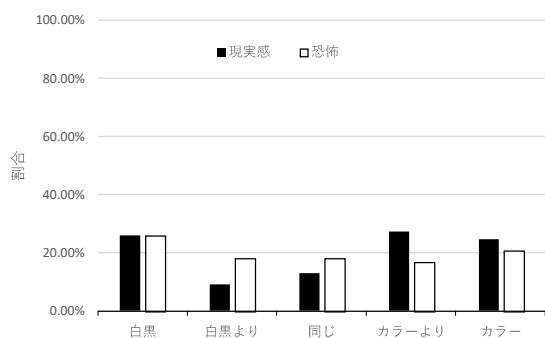
(b) 佐波中学校 2 年生の結果 (N=82)



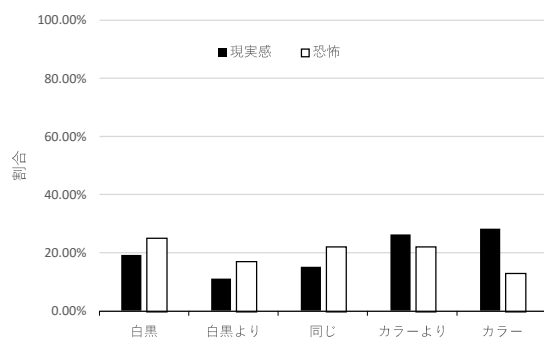
(c) 右田小学校 5 年生の結果 (N=70)



(d) 山口県土木建築部職員の結果 (N=175)



(e) 防災士講習会受講者の結果 (N=77)



(f) 防災イベント参加者の結果 (N=99)

図-1 Case1 に対するアンケート結果

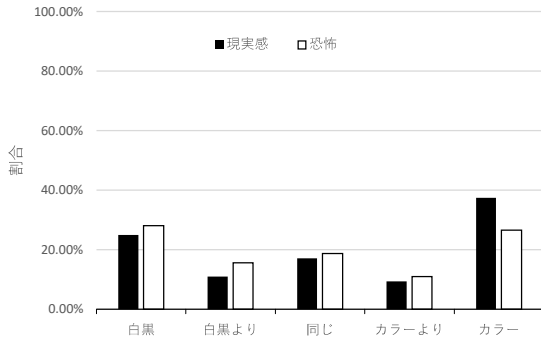
次いでカラー (20.00%, 14件) となっている。

土木建築部職員の有効回答数は175である。現実感ではどちらかと言えばカラー (37.71%, 66件) が最も回答数が多い。ついでどちらも同じ (30.29%, 53件) となっている。さきほどまでの小学生、中学生とは異なる回答傾向となっている。白黒の回答率と回答数はそれぞれ8.00%, 14件であり回答数が少ない。

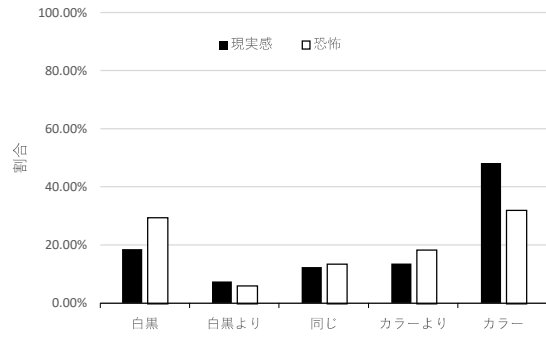
防災士講習会参加者の有効回答数は77である。現実感についてはどちらかと言えば白黒, どちらも同じの回答割合が少なく, それ以外の選択肢はほぼ同様の回答割合となっている。どちらかと言えばカラーは27.27%, 21件, 白黒が25.97%, 20件, カラーが

24.68%, 19件となっている。恐怖感では最も多いのが白黒 (25.97%, 20件) で次いでカラー (20.78%, 16件) となっている。その他は18%以下の回答割合である。恐怖感の回答傾向は小学生, 中学生と同様である。

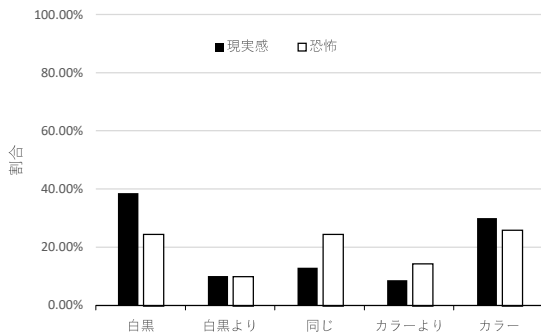
防災イベント参加者の有効回答数は99である。現実感ではカラー (28.28%, 28件) が最も多く, 次いでどちらかと言えばカラー (26.26%, 26件), 白黒 (19.19%, 19件) となっている。これら以外のどちらかと言えば白黒, どちらも同じが少ないという意味では防災士講習会参加者と同様の傾向回答である。恐怖感では白黒 (25.25%, 25件) が最も多い。どちら



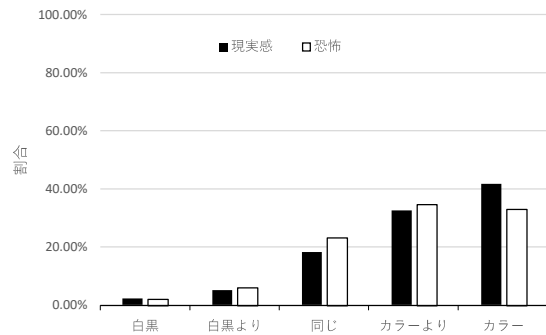
(a) 新田小学校 5 年生の結果 (N=64)



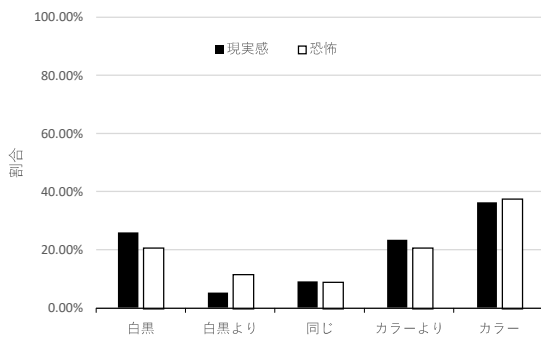
(b) 佐波中学校 2 年生の結果 (N=81)



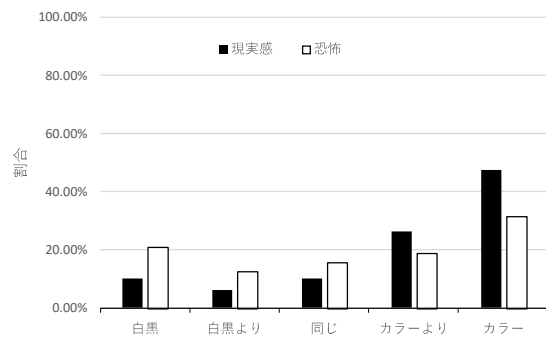
(c) 右田小学校 5 年生の結果 (現実感 N=70, 恐怖感 N=69)



(d) 山口県土木建築部職員の結果 (N=175)



(e) 防災士講習会受講者の結果 (N=77)



(f) 防災イベント参加者の結果 (現実感 N=99, 恐怖感 N=95)

図-2 Case2 に対するアンケート結果

も同じ、どちらかと言えばカラーが同数 (22.22%, 22件) で次点であった。カラーは13.13%, 13件で最も少ない結果となった。

山口県職員以外の回答傾向について、現実感では白黒とカラーに意見が分かれる場合が多く、また恐怖感ではカラーの回答割合よりも白黒の回答割合が多かった。山口県職員の現実感ではどちらも同じ、どちらかと言えばカラーに回答が集まっていた。また恐怖感ではどちらも同じに回答が集まっていた。特に恐怖感について白黒の回答割合が極端に少なかった。

### 3.2 Case2の結果

新田小学校の結果において有効回答数は64である。現実感についてはもっとも多い回答はカラーで37.5% (24件) であった。次に多かった回答は白黒で25.00% (16件) であった。次いで白黒もカラーも同じが18.75%, 12件である。恐怖感については最も多い回答が白黒 (28.13%, 18件) で次に多かったのがカラー (26.560%, 17件) である。両者は1件差であるのでは、ほぼ同数である。3番目がどちらも同じ (20.31%, 13件) であった。他の回答は20%未満である。現実感も恐怖感も主にカラーもしくは白黒に票が入っている。

佐波中学校の有効回答数は81である。現実感についてはカラー（48.15%、39件）が最も多い。次いで多い回答は白黒（18.52%、15件）である。現実感カラーに多くの票が入っているが白黒にも次いで多いことが分かる。恐怖感ではカラーが（32.10%、26件）最も多く、次いで白黒（29.63%、24件）となっている。どちらかと言えばカラーを含めればカラーの回答は47.56%となる。一方で白黒、どちらかと言えば白黒の合計は30.49%であり白黒に恐怖感を感じる回答者も少なくはない。

右田小学校の有効回答数は現実感で70、恐怖感で69である。現実感については白黒（38.57%、27件）が最も多く、ついでカラー（30.00%、21件）でこれらの回答に二分されている。恐怖感ではカラー（26.09%、18件）が最も多く、白黒とどちらも同じが同数で（24.64%、17件）となっている。件数差は1件であるので、これらの回答間には差はなく同等である。

土木建築部職員の有効回答数は175である。現実感ではカラー（41.71%、73件）が最も回答数が多い。次いでどちらかと言えばカラー（32.57%、57件）となっている。これらの回答割合の合計は74%となり、ほとんどの回答をこれらで占めている。白黒の回答率は2.29%、4件であり、回答者は非常に少ない。恐怖感ではどちらかと言えばカラー（34.86%、61件）、カラー（33.14%、58件）であった。これらで68%を占めており、多くはカラー画像の方に恐怖感を感じている。白黒は回答率が2.29%、4件で最も少ない。これまでのケースと同様、この回答傾向も小学生、中学生と全く異なる。

防災士講習会参加者の有効回答数は77である。現実感についてはカラー（36.36%、28件）で最も多く、次いで白黒（25.97%、20件）、どちらかと言えばカラー（23.38%、18件）となっておりカラーが最も多いが三分されている。恐怖感ではカラー（37.66%、29件）が最も多い。白黒とどちらかと言えばカラーは同数で20.78%、16件となっている。現実感と同様、三分されている。白黒にも比較的多く票が入っているのは小学生、中学生と同様の傾向である。

防災イベント参加者の有効回答数は現実感で99、恐怖感で95である。現実感ではカラー（47.47%、47件）が最も多く、次いでどちらかと言えばカラー（21.05%、26件）となっている。カラー側に現実感があると回答した回答者は73.73%である。一方、白黒の回答率は10.10%、10件であり防災士受講者よりも割合は少ないが、土木建築部職員よりも多い。恐怖感ではカラー（31.58%、30件）が最も多く、ついで白黒（22.68%、20件）で次点であった。カラーと白黒が筆頭、準筆頭であることは防災士講習会と同

様の回答傾向である。

小学生、中学生において、現実感カラーまたは白黒に分かれる傾向がある。一方、恐怖感カラーと白黒に分かれるが、右田小学校ではどちらも同じも回答数が多かった。山口県職員の回答傾向は、現実感、恐怖感ともに白黒の回答が極端に少ないことである。防災士講習会参加者と防災イベント参加者の回答傾向は小学生・中学生と似ている。

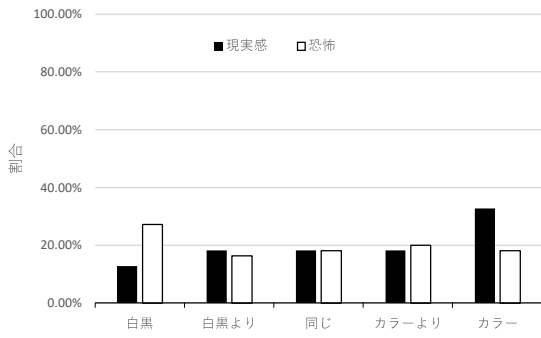
### 3.3 属性別の結果

山口県職員に回答傾向が同じ成人である防災士講習会参加者や防災イベント参加者と異なる。いずれも成人であるが山口県職員は防災に精通した専門職員の一面がある。防災イベント参加者は一般人と防災関係者に分類されるので、両者で回答に差異があるか検討した。各ケースの結果をそれぞれ図-3、図-4に示す。

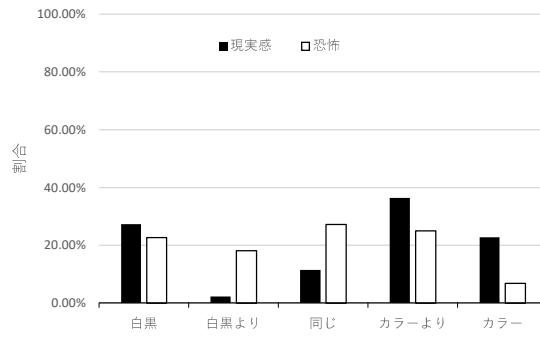
図-3はCase1に対する一般人と防災関係者の比較である。有効回答数は一般人で55、防災関係者で44である。現実感については、一般人はカラーが最も多く32.73%である。その他の回答は白黒を除けば18%程度ほぼ同じ割合である。白黒は12.73%であり、最も低い割合である。一方、防災関係者では、どちらかと言えばカラーが最も高く36.36%である。次点が白黒で27.27%となっている。一般人の防災関係者もカラー側の回答が多いが、防災関係者は白黒に現実感を覚える割合が高いことが興味深い。しかしながら、山口県職員は白黒もカラーも回答率が低いため、防災イベント参加者との感じ方は異なっている。

恐怖感については一般人では白黒が27.27%で最も高い。それ以外の回答割合は16~20%程度でほぼ同等である。一方、防災関係者はどちらも同じが27.27%で最も高く、次いでどちらかと言えばカラーが25.00%、白黒が22.73%となっている。カラーは6.82%で最小となっている。どちらも同じが最も高いのは山口県職員と同じではあるが、白黒にも少なくない回答割合であるところが、異なっている。一般人、防災関係者ともに白黒にも少なくない回答割合であることが確認できる。

図-4はCase2に対する一般人と防災関係者の比較である。有効回答数は一般人の現実感では55、恐怖感が52であり、防災関係者のそれらは44、43である。現実感については、一般人はカラーが最も多く50.91%である。次いでどちらかと言えばカラーが23.64%、白黒とどちらも同じが9.09%である。カラー側に回答が集まっているのは山口県職員と同様であるが、白黒側にも多くはないが回答が集まっている。防災関係者では一般人と同じく、カラーの30.23%、白黒とどちらかと言えばカラーが同じ割合で20.93%

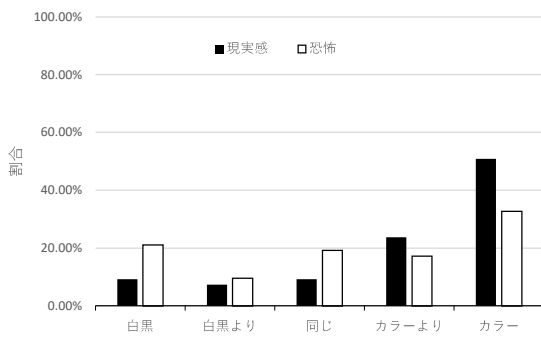


(a) 一般人の結果 (N=55)

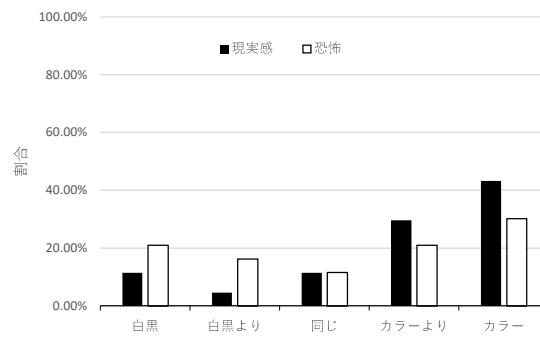


(b) 防災関係者の結果 (N=44)

図-3 Case1 に対するアンケート結果



(a) 一般人の結果 (現実感 N=55, 恐怖感 N=52)



(b) 防災関係者の結果 (現実感 N=44, 恐怖感 N=43)

図-4 Case2 に対するアンケート結果

である。傾向的には一般人と類似しており、山口県職員との相違も一般人と同様である。

恐怖感については一般人ではカラーが32.69%、白黒が21.15%、どちらも同じが19.23%、どちらかと言えばカラーが17.31%となっている。カラーが筆頭であるが、白黒、どちらも同じ、どちらかと言えばカラーはほぼ類似の値となっている。山口県職員の回答と比較するとCase2と同様に決定的に異なるのは白黒の回答割合である。山口県職員の白黒の回答割合は非常に低いものであった。一方、防災関係者では、最も高い回答割合がカラーで30.23%である。次いで白黒とどちらかと言えばカラーが同じ割合で20.93%であった。他の選択枝の回答割合は11~16%である。一般人と防災関係者を比較すると傾向的には類似しており一般人と防災関係者で違いは見られない。山口県職員との相違も一般人と同様である。

#### 4. おわりに

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、元画像である白黒写真とカラー化された写真を比較して、どちらが現実感を抱きやすいのか、ど

ちらが恐怖感を抱きやすいのかについてアンケート調査を行った。山口県を流れる一級河川である佐波川で発生した水害を対象とした。アンケート対象者は防府市立新田小学校5年生(64名)、防府市立佐波中学校(82名)、防府市立右田小学校(70名)、山口県土木建築部職員(175名)、山口県防災士講習会参加者(77名)、防府市メバル公園で開催された防災イベント参加者(99名)である。小中学生と成人に分けられる。山口県土木建築部職員はgoogle formatを利用したインターネット調査で行ったが、それ以外は対面形式で調査を行った。得られた結果を大まかにまとめると以下ようになる。

白黒写真をカラー化した写真において、現実感については写真によって回答傾向が若干異なる場合もあるが、小学生、中学生はカラーもしくは白黒への回答が多い傾向にある。どちらかというカラーの回答を含めるとカラー側の回答が多い傾向となる。一方、成人である防災士講習会参加者と防災イベント参加者も概ね小学生、中学生と同様の傾向を示している。山口県職員も同様の傾向ではあるが、白黒の回答割合が少ないのが特徴的である。

恐怖感についても、現実感と同様小学生、中学生はカラーもしくは白黒への回答が多い傾向にある。

特に白黒の回答割合が高いことが特徴的である。防災士講習会参加者と防災イベント参加者も概ね小学生、中学生と同様の傾向を示している。白黒への回答割合も比較的高い。しかしながら山口県職員はカラー側の回答が高く、白黒への回答割合が極めて低い結果が見られた。

カラー化写真は現実感を与えるには良い方法であると示唆される。一方、恐怖感についてはそれほど単純ではなく、小・中学生対象であれば白黒の方が被災の恐ろしさが伝わる可能性がある。対象年齢や目的に合わせて白黒、カラーを使い分けることも重要と示唆された。

## 謝 辞

佐波川の過去の災害写真をはじめ多くの資料を提供して頂いた国土交通省中国地方整備局山口河川国

道事務所河川管理課に深甚なる謝意を表します。

## 参考文献

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.

佐古憲作（2011）：危古文書から過去の土砂災害発生を推定する～平成21年7月 山口県防府市における土砂災害を例にして～，砂防と治水，第201号，pp.80-85.

Image Colorizer: <https://imagecolorizer.com/ja>

Data Chef: <https://tech-lagoon.com/datachef/index.html>  
siggraph2016\_colorization:

<https://colorize.dev.kaisou.misosi.ru/>

第 60 回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集

2023 年 9 月 25 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）

五十嵐 晃（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>