

## 2023年5月5日の地震を含む能登半島北東部陸海域で継続する 地震と災害の総合調査 その1

平松良浩<sup>1</sup>・岡田知己<sup>2</sup>・吉田圭佑<sup>2</sup>・高木涼太<sup>2</sup>・篠原雅尚<sup>3</sup>  
・酒井慎一<sup>4</sup>・蔵下英司<sup>3</sup>・西村卓也<sup>5</sup>・太田雄策<sup>2</sup>・木下陽平<sup>6</sup>  
・宮崎真一<sup>7</sup>・後藤忠徳<sup>8</sup>・笠谷貴史<sup>9</sup>・吉村令慧<sup>5</sup>・田中愛幸<sup>10</sup>  
・宮澤理稔<sup>5</sup>・荒木英一郎<sup>11</sup>・森下知晃<sup>1</sup>・鹿児島涉悟<sup>12</sup>・石山達也<sup>2</sup>  
・立石 良<sup>13</sup>・安江健一<sup>13</sup>・廣内大助<sup>14</sup>・松多信尚<sup>15</sup>・宍倉正展<sup>16</sup>  
・岩田知孝<sup>5</sup>・浅野公之<sup>5</sup>・大堀道広<sup>17</sup>・村田 晶<sup>1</sup>・石川浩一郎<sup>18</sup>  
・山岸邦彰<sup>19</sup>・須田達<sup>19</sup>・山崎新太郎<sup>5</sup>・青木賢人<sup>20</sup>・林 紀代美<sup>20</sup>  
・武田公子<sup>21</sup>・田中純一<sup>22</sup>・井口克郎<sup>23</sup>・佐々木大輔<sup>24</sup>・原 裕太<sup>24</sup>  
・吉田 浩<sup>25</sup>・松本 聡<sup>26</sup>・江本賢太郎<sup>26</sup>・山中佳子<sup>27</sup>・勝俣 啓<sup>28</sup>  
・前田拓人<sup>29</sup>・石瀬素子<sup>30</sup>・古谷 元<sup>31</sup>・小林俊一<sup>1</sup>・高原利幸<sup>32</sup>  
・金澤伸一<sup>33</sup>・保坂吉則<sup>33</sup>・王 功輝<sup>5</sup>・卜部厚志<sup>34</sup>・片岡香子<sup>34</sup>  
・高清水康博<sup>35</sup>・永松伸吾<sup>36</sup>・由比政年<sup>1</sup>・犬飼直之<sup>37</sup>・榎田真也<sup>1</sup>  
・有田 守<sup>32</sup>・馬場俊孝<sup>38</sup>・二宮順一<sup>1</sup>・郷右近英臣<sup>39</sup>・林 豊<sup>40</sup>  
・多々納裕一<sup>5</sup>・梶谷義雄<sup>41</sup>・中山晶一朗<sup>42</sup>・藤生 慎<sup>42</sup>

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

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

## 要 旨

2020年末から地殻変動を伴う群発地震活動が継続する能登半島北東部では、2023年5月5日にマグニチュード6.5（最大震度6強）の地震が発生し、さらに2024年1月1日にはマグニチュード7.6（最大震度7）の地震が発生した。この一連の地震活動の発生メカニズムおよびその災害像や地域社会・地域経済への影響を明らかにするために、令和5年度科学研究費助成事業（特別研究促進費）による総合調査として、地震観測、測地観測、電磁気観測、重力観測、温泉成分測定、活構造調査、強震観測、震災被害調査、地域社会影響調査、津波調査、地域経済・復興過程影響調査を実施している。

### 1. はじめに

2020年末から地震活動の活発化と局所的な地殻変動が始まった能登半島北東部において、2023年5月5日にマグニチュード6.5、最大震度6強の地震が発生した。この地震による人的被害は、死者1人、重傷者2人、軽傷者45人であり、住家被害は、全壊38棟、半壊263棟、一部破損1384棟であった（石川県危機管理監室、2023）。この地震後、地震活動域は北側の海域に大きく広がり、地震像や被害要因の解明のためには、陸域のみならず海域においても調査観測を実施する必要性が生じ、令和5年度科学研究費助成事業（特別研究促進費）「2023年5月5日の地震を含む能登半島北東部陸海域で継続する地震と災害の総合調査」が実施されることとなった。

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

21日14時現在）（石川県危機管理監室危機対策課、2024）。また、道路の寸断や能登半島の日本海側の海岸でのメートルオーダーの地盤隆起による港湾機能の喪失により、多数の孤立集落が発生し、半島型の災害として注目された。令和6年能登半島地震の発生を受けて、科学研究費助成事業（特別研究促進費）の総合調査に追加助成と研究期間の令和6年度末までの延長があり、研究分担者および研究テーマの追加が行われた。

### 2. 研究計画の概要

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

表1 12のテーマの研究分担者

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

半島地震を受けての追加助成の際に新規に立ち上げられたテーマである。

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

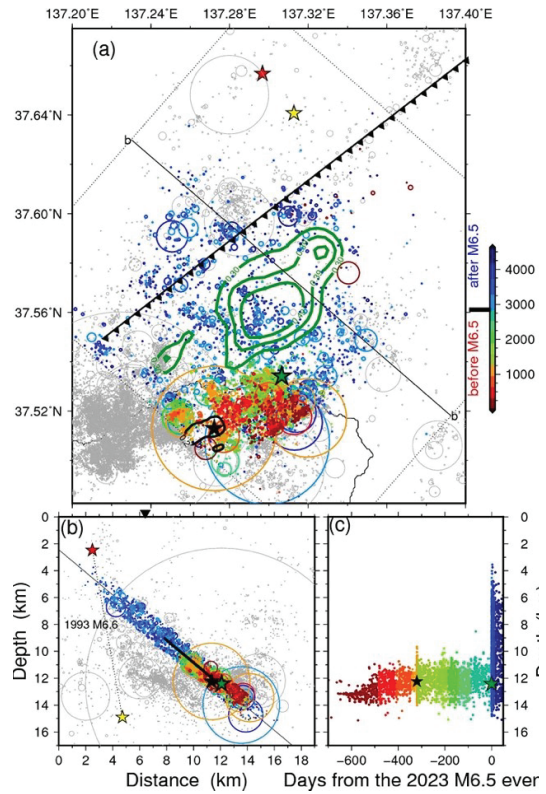


図-1 能登半島の地震活動：珠洲沖活断層セグメント・1993年M6.6地震と2023年M6.5地震の関係 (Yoshida et al., 2023b)。

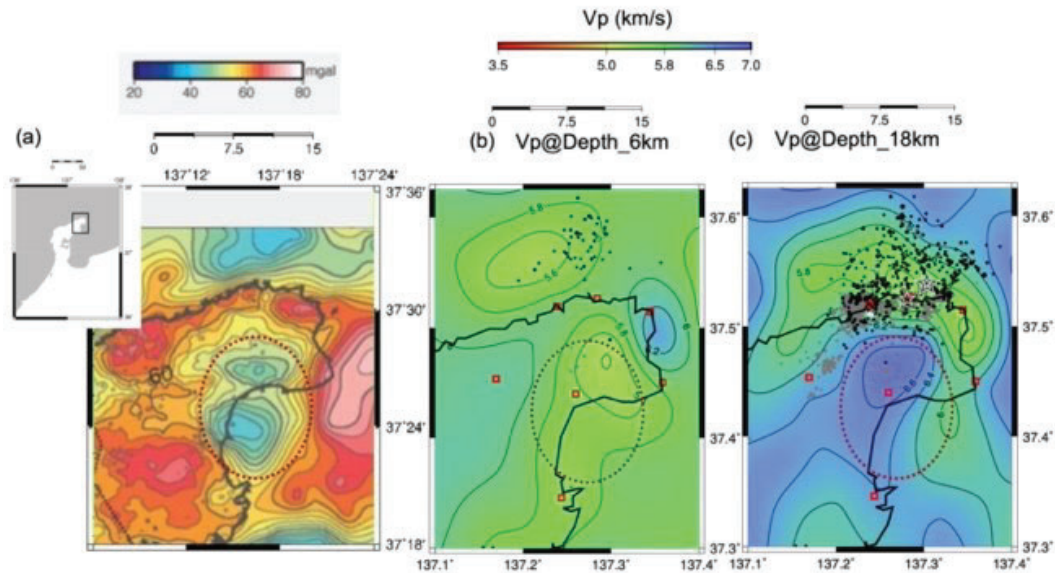


図-2 能登半島北東部の地殻構造 (Okada et al., 2024)。a) 澤田・他 (2012)によるブーゲー重力異常。赤点線の楕円は低重力異常域を示す。(b) 深さ6kmのVp、灰色は2018年から2023年のM6.5地震前までの地震。白星は2022年M5.4の地震。黒は2023年のM6.5地震以降の地震。黒星は2023年M6.5の地震。赤四角は使用した観測点。(c) 深さ18kmのVp。

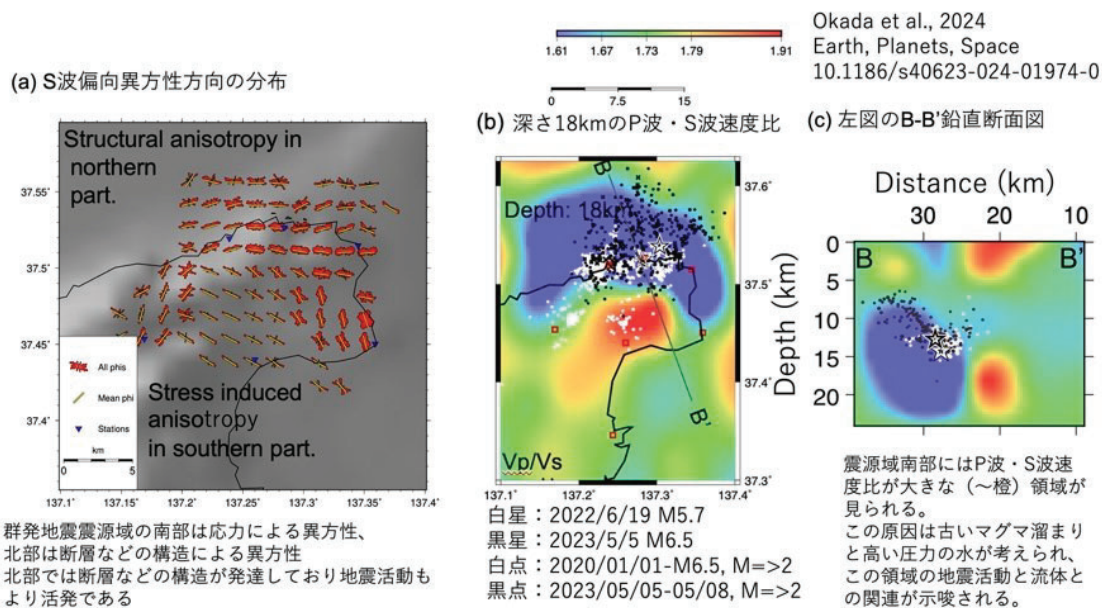


図-3 (a) 能登半島群発地震震源域におけるS波偏向異方性方向。(b) 深さ18kmにおけるVp/Vs構造 (c) B-B'断面図。Okada et al. (2024)より引用。

### 3. 研究成果の概要

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

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

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

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

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

#### 3.2 海陸統合臨時地震観測による群発地震活動の把握

##### 3.2.1 2023年5月5日M<sub>j</sub>6.5後の地震活動域における海陸統合臨時地震観測

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

することで、稠密な海陸統合地震観測網を構築した。これら海域と陸域に設置した臨時オフライン観測点と、能登半島やその周辺域のテレメータ観測点（23カ所）で得られている波形データとの統合処理を実施した。統合処理後のデータに対して気象庁一元化震源カタログに基づいたイベント毎へのデータ編集作業を実施した。イベントデータから、観測期間中に海陸統合地震観測網内で発生した203個 ( $M_j \geq 1.0$ )の地震を抽出し、各観測点におけるP波到達時刻、S波到達時刻、最大振幅、P波初動振動方向の読み取り作業を行った。 $M_j 6.5$ 後に広がった群発地震活動域における3次元速度構造と詳細な震源分布を得る為に、得られた走時データを用いて地震波トモグラフィ解析 (Zhang and Thurber, 2003)を実施した。また、トモグラフィ解析で得られた速度構造を使用し、2023年5月5日から2024年1月1日までの気象庁一元化処理震源の検測値を用いた震源再決定を行った。得られた震源分布からは、珠洲市北岸沖から、南東傾斜の震源分布が確認できる。その深さは「日本海地震・津波調査プロジェクト」によるモデル断層のNT5よりも深部側に位置する。気象庁一元化震源と比較すると、海陸統合データによる震源の方が数kmほど浅く求まれ、線状に配列している。また、南東傾斜を示す震源分布の深部近傍には、周囲より $V_p/V_s$ が高く、 $V_p$ が低くなる領域が存在することから、流体の存在が示唆される。

### 3.2.2 令和6年能登半島地震の海域緊急余震観測

令和6年能登半島地震の海域緊急余震観測を、自由落下自己浮上式海底地震計(OBS)を用いて実施している。海洋研究開発機構所属学術研究船「白鳳丸」による緊急調査航海(2024年1月16日 東京出港-1月23日 富山入港)により、OBSの設置を行った。使用したOBSの種類は、短周期地震計を用いた短期観測型OBS (SPOBS)、長期観測型OBS (LTOBS)、および広帯域OBS (BBOBS)である。設置したOBSのうち、SPOBSは、学術研究船「白鳳丸」緊急調査航海(第二次)(2月18日 新潟出港-3月1日 富山入港)により回収された。1月に設置したLTOBSとBBOBSについては、海底観測を継続すると共に、「白鳳丸」緊急調査航海(第二次)により、長期観測可能なOBSを追加設置した。2月下旬に回収されたSPOBS 25台と能登半島東部の陸上観測点4点のデータを用いて、余震震源決定を行った。気象庁一元化リストに基づき、観測期間内で観測網近辺に震央がある $M_j 1.7$ 以上の地震881個について、読み取りを行った。この領域では、OBSとエアガンを用いた構造探査 (Nakahigashi et

al., 2012)が行われており、その結果から一次元速度構造を作成し、震源決定を実施した。まず、絶対走時と一次元構造を用いる震源決定プログラム (Hirata and Matsu'ura, 1987)により、初期震源を決定した。その際、SP変換波、PS変換波の到着時刻を基とした観測点補正値を導入し、観測点直下の速度不均質を補正した。その後、初期震源を用いて、Double Difference法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000)により再決定を行った。震源再決定の結果、余震は「日本海地震・津波調査プロジェクト」による断層モデルに沿うように分布し、能登半島沿岸では深さ10km程度まで、沖合では深さ18km程度まで発生していることがわかった。「日本海地震・津波調査プロジェクト」によるモデル断層NT2の深部において、最も深い地震が発生しているが、NT2の北端では地震活動がみられない。気象庁一元化震源と比較すると、OBSデータによる震源は10kmほど浅く求目られている。震源再決定された地震について、各観測点のP波初動極性から、グリッドサーチ法 (Reasenber and Oppenheimer, 1985)を用いて発震機構解を求めた。各観測点への射出角と方位角は、DD法で求められた値を用いた。得られた発震機構解をFrohlich (2001)に従って分類した結果から、逆断層型の余震が発生していると共に、横ずれ型の地震も数多く発生していることが推察される。

### 3.3 測地観測による地殻変動メカニズムの解明

GNSSの観測解析では、2024年1月16-17日に $M7.6$ の地震の震源域の西端付近の3か所で臨時観測を新たに開始した。周辺の国土地理院GEONET定常観測点、大学と地理院の臨時観測点、及びソフトバンク株式会社の独自基準点のデータを合わせた統合解析を実施し、 $M6.5$ 及び $M7.6$ の地震時及び地震前後の詳細な地殻変動の把握とそのメカニズムの推定を行なった。 $M6.5$ 地震については最大約19 cm、 $M7.6$ 地震については、最大約240 cmの地震時地殻変動が観測された。 $M7.6$ 地震については、キネマティック解析による1秒ごとの座標値も計算した。震源に近い能登半島北東部の観測点では、変位が始まってから永久変位に到達するまで20秒以上かかっているのに対し、能登半島北西部の観測点では、5秒程度で永久変位に至っていた。この時間差は、北東部では地下の断層運動が比較的複雑に進展したのに対し、北西部では一気に断層運動が進展したものと考えられる。 $M7.6$ 地震後には余効変動が継続し、地震時地殻変動と似た水平変動パターンを示している。一方、上下変動では能登半島北部は地震時に隆起したのに対し、地震

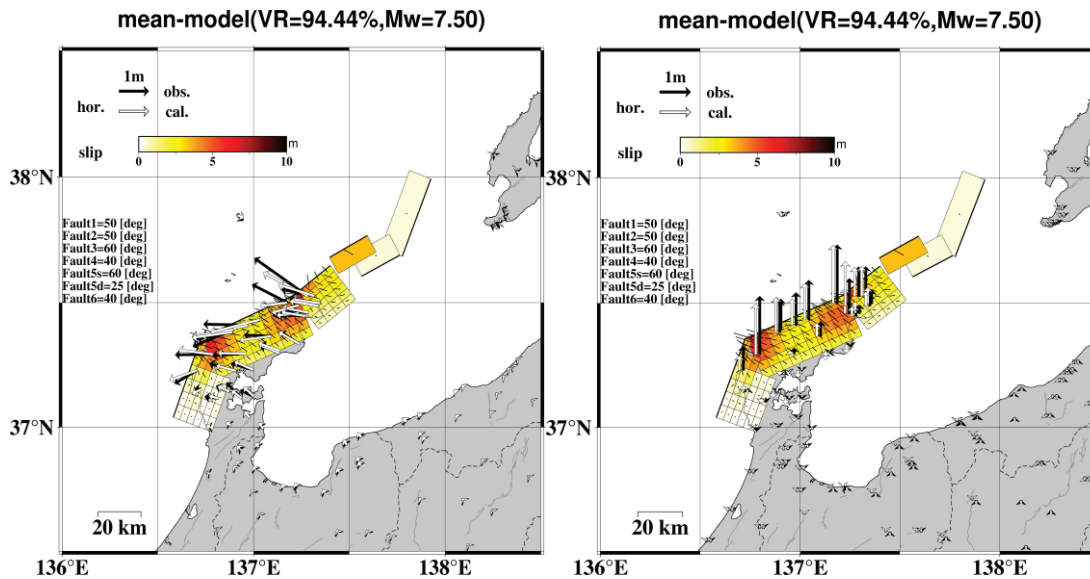


図-4 稠密測地観測データにもとづいて推定された2024年能登半島地震(M7.6)の地震時すべり分布。(左) 推定されたすべり分布とGNSSの水平成分の観測値(黒矢印)と計算値(白矢印)の比較。(右) 推定されたすべり分布とGNSSの上下成分の観測値(黒矢印)と計算値(白矢印)の比較。

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

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

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

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

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

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

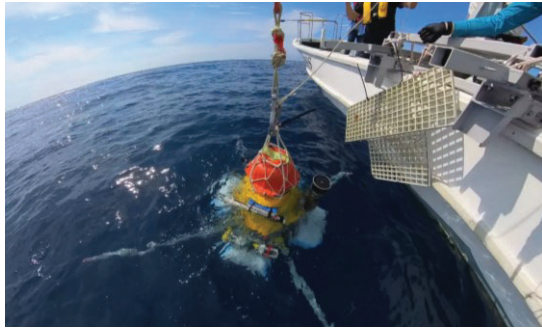


写真-1 海底電位差磁力計 (OBEM) の投入 (2023年8月)の様子。

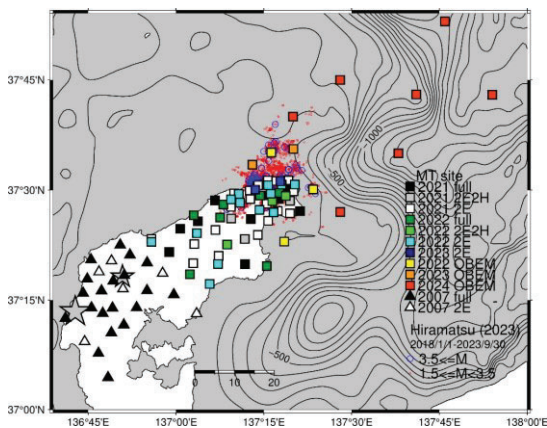


図-5 2023年度末までの能登半島での陸域・海域のMT観測点分布。

か所については現在も計測を継続している (図-5)。

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

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

### 3.5 超高感度地殻活動観測による地殻流体挙動の解明

#### 3.5.1 重力観測

2023年度は5月、9月、1月、3月の計4回、重力観測を実施した。観測は、京大防災研・金沢大の協力のもと東大理学系・東大地震研・富山大が共同で行っ

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

#### 3.5.2 光ファイバセンシング

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

### 3.6 温泉水の化学分析による能登半島の物質循環像の調査

#### 3.6.1 温泉水の科学分析

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





写真-2 温泉水試料の採取風景。

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

### 3.6.2 火山岩類の分析

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

## 3.7 活構造調査による震源域の古地震活動像の解明

### 3.7.1 2023年5月5日の地震（M6.5）および2024

### 年1月1日の地震（M7.6）による隆起量調査

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

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

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

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

## 3.8 震源過程と強震観測に基づく高震度生成過程調査

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

### 3.8.1 M6.5の震源過程と強震動生成過程

地震活動が続く能登半島北部において2023年5月

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

### 3.8.2 強震記録に基づくM7.6の震源過程

2024年1月1日に発生し、最大震度7を観測したM7.6の地震の震源過程を強震記録の波形インバージョンにより推定した。初めに、能登半島沿岸部の震源断層が破壊し、能登半島北西部での隆起や強震動の主要因と考えられる大きなすべりが生じた。最初の破壊の約13秒後に、珠洲市直下で第2の破壊が開始し、主として富山トラフ方面に向かって東向きに破壊が伝播し、海域の直下で大きなすべりを生じ、結果として $M_w$ 7.3程度の地震が連動して発生することで、全体として $M_w$ 7.5の地震になったと推定された。引き続き、緊急の海底地震観測や地殻変動調査の進展による詳細な情報を踏まえ、断層破壊モデルの改良と高震度生成過程との関係について調査を継続していく必要がある。

### 3.8.3 強震観測に基づく珠洲地震被害域の強震動特性

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

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

## 3.9 震災による被害状況の調査と再建に関する検討

### 3.9.1 令和5年奥能登地震(M6.5)

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

### 3.9.2 令和6年能登半島地震(M7.6)

令和6年能登半島地震(M7.6)による建物被害全数調査については、先の地震と同様な手法により実施した。調査対象地区として9地区(珠洲市正院地区、飯田地区、宝立町鶴飼地区、輪島市河井地区、鳳至地区、門前町走出・館地区、門前町道下地区、門前町黒島地区、穴水町大町地区)調査した。調査棟数は7,000棟強である。現在、調査分析中であるが、1981年以前建築(旧耐震基準)の建物は9割程度に被害が生じた一方、現行設計基準(2000年以降)建築では3割程度の被害、かつD4以上の被害が5%程度に留まっていることが明らかとなった。また、令和5年奥能登地震の影響が建物に残っていること、すなわち建物塑性応答させる程度の繰り返し地震動が建物被害に対し強く影響することが、地区ごとの調査結果から示唆された。さらに、2007年能登半島地震を受けた建物改修の程度が、今回の地震被害に影響していることが明らかとなったため、今後の再建、建物改修についての検討課題となると考えられる。

内等で液状化が発生したとの報告があるが、図中に

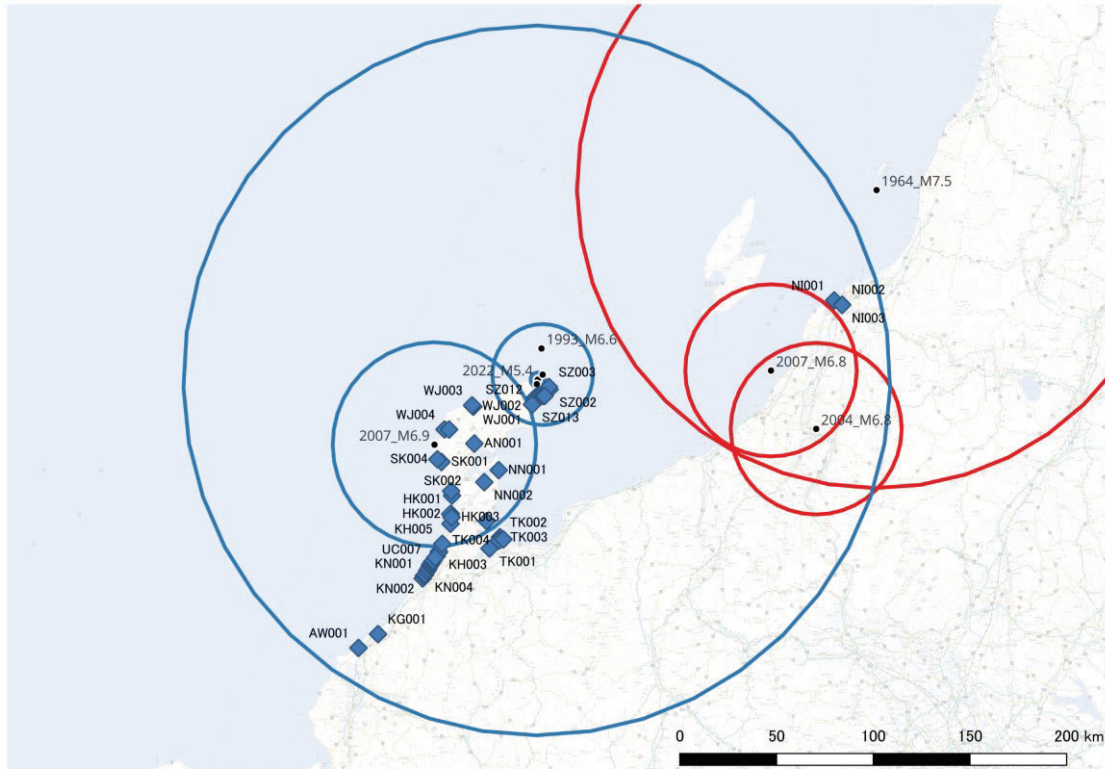


図-6 2024年M7.6地震による液状化発生確認地点および液状化限界震央距離

### 3.9.3 地盤の液状化発生状況とその特徴

地震動による直接的な地盤災害は主に地盤の液状化現象と斜面災害に分けられる。本報告では前者について説明する。地盤の液状化が発生しやすい条件は、(1) 緩い砂質土、(2) 間隙が水で飽和、(3) 激しい繰返しせん断、の3つである。北陸地域の日本海沿岸には日本でも有数の規模の大きな海岸砂丘が発達している(藤, 1975)。特に内陸側・潟湖側の砂丘末端部は緩く堆積した砂地盤で地下水位も地表面に近いため、北陸地域には砂丘近辺に潜在的に地盤の液状化リスクが高いエリアがある。一方で液状化を生じさせる地震動については、気象庁マグニチュードMと液状化限界震央距離R[km]の関係式  $\log_{10} R = 0.77M - 3.6$  (栗林ら, 1975)が知られている。これらを念頭に2023年M6.5地震と2024年M7.6地震で発生した地盤の液状化被害を説明する。2024年M7.6地震による液状化発生確認地点と液状化限界震央距離Rを図-6に示す。図中の同心円は、2024年地震の他、1993年能登半島沖地震、2007年能登半島地震、1964年新潟地震、2004年中越地震、2007年中越沖地震による液状化限界震央距離である。2024年M7.6地震では $R \approx 178.6$ [km]となるが、今回の液状化発生状況は栗林らの式と良い整合を示す。なお報道等によれば福井県坂井市の福井港臨港道路、新潟県佐渡、富山市

は記入していない。5次(250m)メッシュの微地形分類(若松ら, 2020)を援用し液状化発生確認地点の微地形を調べたところ、自然地盤では砂丘、海岸低地、砂州、人工地盤では海岸・湖沼沿いの埋立地や後背湿地上の宅地盛土で液状化の発生が確認された。

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

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

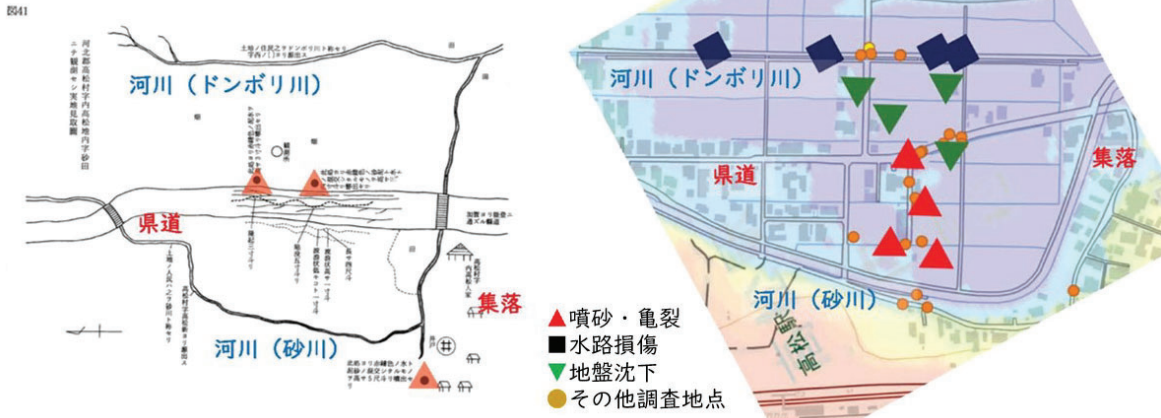


図-7 かほく市内高松における濃尾地震(1891)と能登半島地震(2024)の液状化発生状況

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

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

過去の地震で地盤の液状化が発生した地点で再度液状化が発生することを地盤の再液状化と呼ぶ。2024年M7.6地震で地盤の液状化が発生した地点のうち、過去の地震で液状化発生の記録が残されている地点を列挙する。濃尾地震(1891):かほく市内高松、内灘町大根布、内灘町室(村松ほか,1992)。このうち内高松については概略地図が添えられており、今回の液状化発生とほぼ同じ地点で過去にも液状化が発生していることが確認できた。金沢地震(1799):金沢市栗崎、内灘町根布、宮坂、荒谷、かほく市大崎(寒川,1986)。砂丘の砂が崩壊して家屋が埋没、渦中に砂が噴きだして島を形成、などの記録が残されている。飛越地震(1861):高岡市伏木、高岡市吉久(内閣府,2008)。地割れや水砂が噴きだす等の記録が残されている。さらに能登半島沖地震(1993)では

珠洲市飯田町(埋立地)、正院町(自然地盤の宅地)、蛸島町(埋立地)の液状化発生事例(森ら,1993)があり、2007年能登半島地震では、宅地の液状化事例として輪島市門前町(清水、道下、広瀬)や珠洲市正院、また港湾地区における海岸埋立地の液状化事例として、志賀町(松ケ下港)、輪島市(輪島港)、穴水町(穴水港)、七尾市(七尾港)、高岡市(伏木港)が報告されている(土木学会・地盤工学会,2007)(沼田ら,2007)。2023年M6.5地震では珠洲市内の2か所、飯田港周辺および蛸島漁港で噴砂を確認した。いずれも海岸付近の埋立地であり、1993年能登半島沖地震、2007年能登半島地震でも噴砂が発生したとの報告がある。珠洲市内の多くが限界震央距離以内に位置するが、この他の地点では噴砂等の液状化を示唆する痕跡は見つけられなかった。

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

2023年M6.5地震と2024年M7.6地震による地盤の液状化について俯瞰的に考察した。現時点での知見として、地盤の液状化リスクが高い地点は何度でも液状化が発生する可能性があること、栗林らの限界

震央距離は液状化リスクの高い地点の液状化可能性を適切に推定できること、砂丘末端部の液状化発生やその程度には、地下水面の位置が要因となることが挙げられる。一方、地盤は堆積環境などの履歴、強度や物性分布、地下水面位置などが、地点ごとに大きく変化することがある。また液状化発生やその程度は入力地震動の大きさに強く依存する。具体的な液状化対策実施に当たっては、適切な外力設定や、地盤状況を把握する現地調査の実施など、慎重な検討が必要である。

### 3.10 社会的脆弱性による災害時の地域への影響調査

2023年奥能登地震に対しては「津波に対する住民意識」「学校の防災対策に対する影響」「災害時の自治体財政運営」「住宅・生活再建支援の課題」「住民側から見た被災直後の状況の把握」「過疎地域におけるインクルーシブ防災等の現状」の6つのサブテーマを設定して研究を実施した。

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

#### 3.10.1 津波に対する住民意識

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

#### 3.10.2 学校の防災対策に対する影響

「学校の防災対策に対する影響」では石川県内の学校に対し、学校現場の被災に関する情報収集の有無と学校防災計画の確認・見直しに関するアンケート調査を行った。被災地に近い能登地区の学校では積極的な情報収集と安全計画の見直しが行われていたが、加賀地区では自分事化ができておらず、不十分な対応となっていたことが明らかになった。

#### 3.10.3 災害時の自治体財政運営

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

#### 3.10.4 災害時の自治体財政運営

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

#### 3.10.5 住民側から見た被災直後の状況の把握

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

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

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

#### 3.10.6 過疎地域におけるインクルーシブ防災等の現状

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

### 3.11 津波の生成・伝播・遡上特性の解明と断層破壊過程の推定

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

結果として得られた浸水域分布は、波源域との相対位置や海底地形の影響により複雑なものとなった。浸水被害の大半は能登半島北東部に集中し、最大で5mを超える痕跡高が観測されたが、痕跡高の分布は沿岸方向に一律ではなく、珠洲市寺家、飯田、春日野・鶉飼地区および能登町白丸地区に極大値が点在する形で振動的に変化する特徴を示した。対照的に、能登半島の北部から西部にかけては、地震に伴う地盤隆起が、津波遡上・浸水に対して防護的役割を果たしたこともあり、陸地への浸水はごく一部の地点に限定された。富山県内における津波遡上高は、石川・新潟県と比較して小さく、居住域への浸水被害は発生していない。一方、東側の断層と直面する新潟県においても大きな津波痕跡高が確認された。特に、前面に水深の浅い領域の広がる上越海岸において高い痕跡高が観測された。

### 3.12 地域経済への影響と復興過程の調査

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

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

## 4. 研究成果の発信

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

## 5. おわりに

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

## 謝 辞

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

## 参考文献

- 青木賢人・林 記代美・小倉拓郎 (2024): 令和6年能登半島地震の震災遺構と震災復興ツーリズムの提案. 2024年日本地理学会春季学術大会【緊急公開シンポジウム】令和6年能登半島地震.
- 土木学会・地盤工学会 (2007): 2007年能登半島地震被害調査報告書, 第3章「地盤の液化化」.
- Frohlich C. (2001): Display and quantitative assessment of distributions of earthquake focal mechanisms, *Geophys. J. Int.*, 144, 300-308.  
<https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.2001.00341.x>
- 藤 則夫 (1975):北陸の海岸砂丘, *The Quaternary Research* 14(2), 195-220, 1975.
- Fujii, Y. and Satake K. (2024): Slip distribution of the 2024 Noto Peninsula earthquake (MJMA 7.6) estimated from tsunami waveforms and GNSS data. *Earth Planets Space* 76, 44. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01991-z>
- Hirata N. and Matsu'ura M. (1987): Maximum-likelihood estimation of hypocenter with origin time eliminated using nonlinear inversion technique. *Phys Earth Planet Int* 47, 50-61. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(87\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0031-9201(87)90066-5)
- 石川県危機管理監室 (2023): 令和5年奥能登地震による被害等の状況について(第56報)【令和5年7月3日13時00分現在】  
(<https://www.pref.ishikawa.lg.jp/saigai/documents/202307031300higaihou.pdf>) 2024年8月24日閲覧
- 石川県危機管理監室危機対策課 (2024): 令和6年能登半島地震による人的・建物被害の状況について【第154報 令和6年8月21日14時00分現在】  
([https://www.pref.ishikawa.lg.jp/saigai/documents/higaihou\\_154\\_0821\\_1400.pdf](https://www.pref.ishikawa.lg.jp/saigai/documents/higaihou_154_0821_1400.pdf)) 2024年8月24日閲覧
- 国土地理院 (2023): 「だいち2号」観測データの干渉解析による石川県能登地方の地震（2023年5月5日）に伴う地殻変動.  
(<https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20230505noto.html>) 2024年8月9日閲覧
- 国土地理院 (2024): 「だいち2号」観測データの解析による令和6年能登半島地震に伴う地殻変動(2024年1月19日更新)  
([https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20240101noto\\_insar.html](https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/20240101noto_insar.html)) 2024年8月16日閲覧
- 栗林栄一・龍岡文夫 (1975): Brief Review of Liquefaction during Earthquake in Japan, *土質工学会論文報告集*, 15(4), 81-92.
- 村松郁栄・小見波正隆 (1992): 濃尾地震（明治24年）当時のアンケート調査回答集, *防災科学技術研究所研究資料*, 155, 1-841.
- 森 伸一郎・三輪 滋・関 眞一(1993): 1993年2月7日能登半島沖地震における液化化調査, 第48回土木学会全国大会講演概要集.
- 内閣府 (2008): 災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 1858飛越地震, 2.1節 平野部の被害.
- Nakahigashi K., Shinohara M., Kurashimo E., Yamada T., Kato A., Takanami T., Uehira K., Ito Y., Iidaka T., Igarashi T., Sato H., Obana K., Kaneda Y., Hirata N., Iwasaki T., Kanazawa T. (2012): Seismic structure of the source region of the 2007 Chuetsu-oki earthquake revealed by offshore-onshore seismic survey: asperity zone of intraplate earthquake delimited by crustal inhomogeneity, *Tectonophysics*, 562-563, 34-47.  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.06.052>
- 沼田淳紀・上明戸 昇・三輪 滋・池田隆明 (2007): 2007年能登半島地震における液化化、土木学会地震工学論文集, 29, 20-29.
- Okada T., Savage M.K., Sakai S., Yoshida K., Uchida N., Takagi R., Kimura S., Hirahara S., Tagami A., Fujimura R., Matsuzawa T., Kurashimo E., Hiramatsu Y., (2024): Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm and their relation with earthquake swarm activity in the Noto Peninsula, central Japan, *Earth Planets Space*, 76, 24. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01974-0>
- 大堀道広・鈴木晴彦・岩田知孝・浅野公之・石塚理・村田 晶 (2023): 2023年5月5日能登地方の地震（M6.5）における珠洲市内臨時観測点の地震動記録について, 日本地震学会2023年秋季大会, S22-11.
- Reasenber P.A., and Oppenheimer D. (1985): FPFIT, FPPLLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions, Open-File Report 85-739, US Department of the Interior, US Geological Survey.  
<https://doi.org/10.3133/ofr85739>
- 寒川 旭 (1986): 寛政11年（1799年）金沢地震によ

- る被害と活断層, 地震2, 39, 653-663.
- Shinohara M., Sakai S., Okada T., Sato H., Yamashita Y., Hino R., Mochizuki K. and Akuhara T. (2022): Precise aftershock distribution of the 2019 Yamagata-oki earthquake using newly developed simple anchored-buoy ocean bottom seismometers and land seismic stations, *Earth Planets Space*, 74, 5. <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01562-6>
- 東北大学・他 (2024): 令和6年能登半島地震について (序報), 第242回地震予知連絡会 (2024年2月29日) 議事概要. (<https://cais.gsi.go.jp/YOCHIREN/activity/242/image242/047.pdf>) 2024年8月24日閲覧
- 若松加寿江・松岡昌志 (2020): 地形・地盤分類250mメッシュマップの更新, *日本地震工学会誌*, 40, 24-27.
- Waldhauser F., and Ellsworth W. L. (2000): A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the northern Hayward fault. *Bull Seismol Soc Am*, 90, 1353–1368. <https://doi.org/10.1785/0120000006>.
- Yoshida K., Uno M., Matsuzawa T., Yukutake Y., Mukuhira Y., Sato H., Yoshida T. (2023a): Upward earthquake swarm migration in the northeastern Noto Peninsula, Japan, initiated from a deep ring-shaped cluster: Possibility of fluid leakage from a hidden magma system, *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, 128. <https://doi.org/10.1029/2022jb026047>
- Yoshida K., Uchida N, Matsumoto Y., Orimo M., Okada T., Hirahara S., Kimura S., Hino R. (2023b): Updip fluid flow in the crust of the northeastern Noto Peninsula, Japan, triggered the 2023 Mw6.2 Suzu earthquake during swarm activity, *Geophys. Res. Lett.*, 50. <https://doi.org/e2023GL106023>
- 吉田 浩 (2024): 能登半島地震で目を引く家屋倒壊耐震建築の状況は, *Wedge ONLINE*, 1-3.
- Zhang, H., and Thurber C. H. (2003): Double-difference tomography: The method and its application to the Hayward fault, California, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93, 5, 1875–1889. <https://doi.org/10.1785/0120020190>.