

# 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。

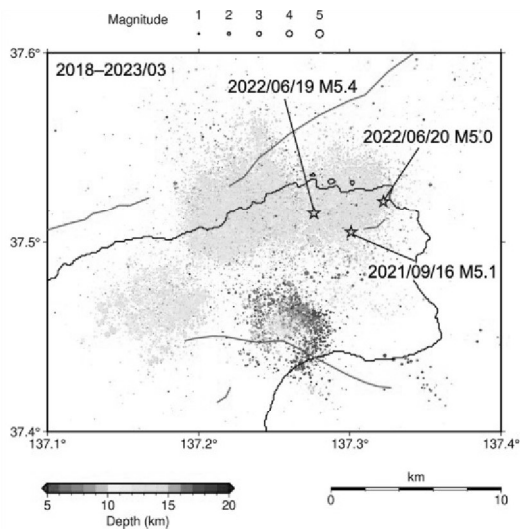


図-1 能登半島北東部における地震活動(2018年から2023年3月末まで)。星印はM5以上の地震、赤線は活断層を表す。

## 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 蔵下 英司 酒井 慎一 飯高 隆 勝間田明男 岡田 知己 吉田 圭佑	東京大学地震研究所 東京大学大学院情報学環 東京大学大学院情報学環 富山大学学術研究部都市デザイン学系 東北大学大学院理学研究科 東北大学大学院理学研究科
テーマ2 西村 卓也 太田 雄策 木下 陽平	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
テーマ3 吉村 令慧 後藤 忠徳 笠谷 貴史	京都大学防災研究所 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
テーマ4 田中 愛幸 宮澤 理稔	東京大学大学院理学研究科 京都大学防災研究所
テーマ5 森下 知晃 鹿児島渉悟	金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 富山大学学術研究部理学系
テーマ6 石山 達也 安江 健一 廣内 大助 松多 信尚	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 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
テーマ7 大堀 道広 村田 晶 岩田 知孝	滋賀県立大学環境科学部 金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 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

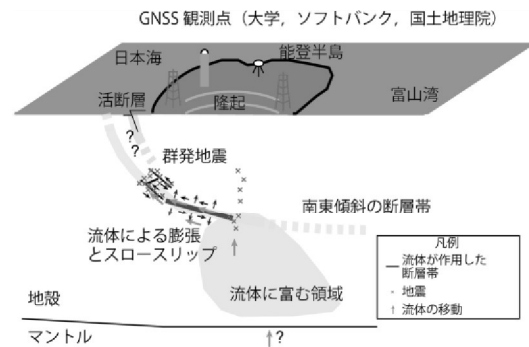


図-2 GNSS観測データから推定された能登半島北東部の群発地震のメカニズムの模式図。Nishimura et al. (2023) プレスリリース資料より引用。

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ゐ

- 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>.