

□ 令和6年能登半島地震と群発地震と海底活断層

国立大学法人金沢大学 理工研究域地球社会基盤学系

教授 平松良浩

1. はじめに

令和6年1月1日16時10分に能登半島北東部を震源とするマグニチュード(M) 7.6の令和6年能登半島地震が発生した。この地震は、石川県で発生した地震としては歴史上最大であり、石川県では初となる震度7を記録した(図1)。北陸地方を中心に広い範囲で強い揺れが観測され、津波も発生した。そのため、家屋の倒壊や津波の浸水、斜面崩壊、液状化現象等が石川県を中心に、富山県、新潟県、福井県等でも見られ、石川県では2024年6月11日時点で、死者260名(災害関連死含む)、行方不明者3名、負傷者1467名の人的被

害があった⁽¹⁾。

震源地付近では、2020年12月頃から地震活動の活発化と非定常地殻変動(プレート境界面での固着による陸側プレートの引きずり込みで生じる定常的な地殻変動とは異なる地殻変動)が観測され、地震活動域が拡大し、群発地震が続く中で、2021年9月16日にはM5.1(最大震度5弱)、2022年6月19日にはM5.4(最大震度6弱)、2023年5月5日にはM6.5(最大震度6強)の地震が発生した。これらの地震活動や非定常地殻変動は水のような流体が原因となって発生したと考えられている。

本稿では、能登半島の奥能登地域での過去の地震活動や令和6年能登半島地震の震源地付近での

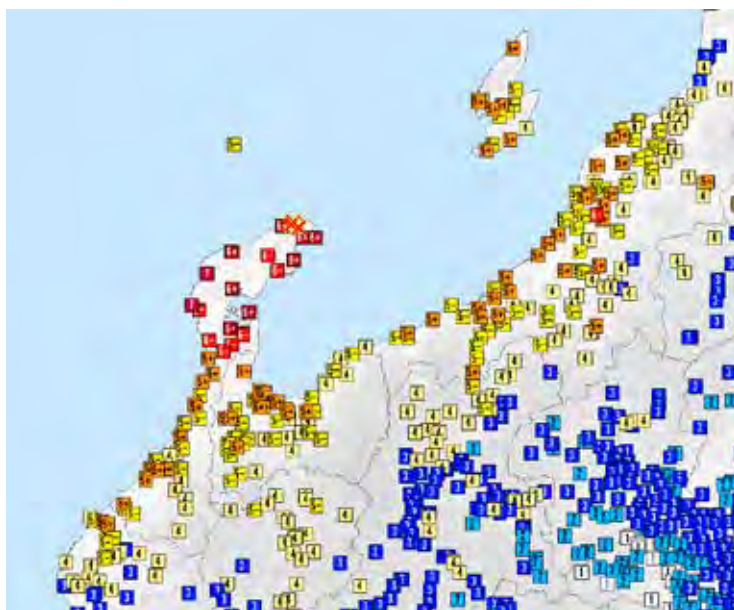


図1. 令和6年能登半島地震の震度分布(気象庁震度データベース検索より)。

群発的な地震活動を踏まえて、令和6年能登半島地震の発生メカニズムについて解説する。

2. 令和6年能登半島地震と能登半島北岸沖合の海底活断層

令和6年能登半島地震（以降、M7.6の地震）は、能登半島の北東部を震源地とする地震である。その余震（後発地震）は能登半島北岸に沿うように能登半島の北東沖（佐渡島の西方沖）から西岸沖にかけての全長約150 kmの範囲に広がっている（図2）。この範囲は、日本海における大規模地震に関する調査検討会による断層モデル⁽²⁾ではF43とF42、日本海地震・津波調査プロジェクトによ

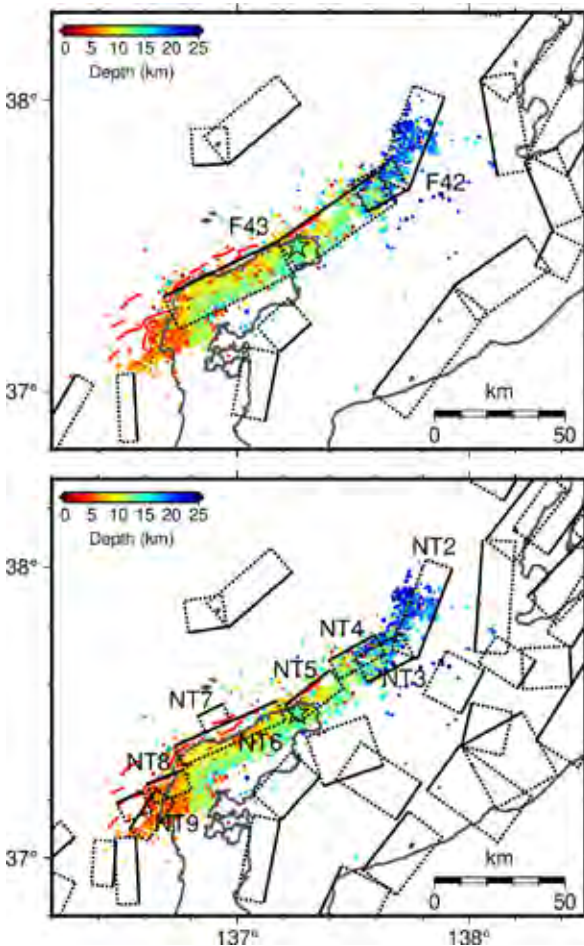


図2. M7.6の地震の余震（後発地震）の分布とM7.6の地震前に公表済みの海域の断層モデル。（上）日本海における大規模地震に関する調査検討会、（下）日本海地震・津波調査プロジェクト。

る断層モデル⁽³⁾ではNT2からNT9に概ね対応する。震源付近で始まった断層破壊は南西側と北東側にそれぞれ拡がり、複数の断層が連動して動くことにより、最終的にM7.6という規模の大きな地震が発生したことが示唆される。

上記の断層モデルの元になる複数の海底活断層が能登半島北岸から西岸の沖合にかけて連続的に分布する。これらの海底活断層は、北東側から順に、珠洲沖セグメント、輪島沖セグメント、猿山沖セグメント、門前沖セグメントと4つに区分されている⁽⁴⁾（図3）。これらの海底活断層は、日本海拡大時に正断層として活動した断層で、圧縮応力場に転換した後に逆断層として活動している。また、これらの海底活断層は南東傾斜、つまり能登半島の下に断層面が延びており、その断層運動によって能登半島を隆起させている。すなわち、能登半島を形成する活断層である。

2007年能登半島地震（M6.9）は門前沖セグメントの東半分が震源断層として活動した地震である⁽⁵⁾。また、離水生物遺骸群集を用いた能登半島北岸の海岸隆起量およびその年代のデータに基づき、現在の輪島市町野町付近で大きな被害を出した1729年の地震（推定M6.6-7.0）は輪島沖セグメントの活動により発生した地震である可能性が報告されている⁽⁶⁾。

M7.6の地震のメカニズムは北西—南東方向に

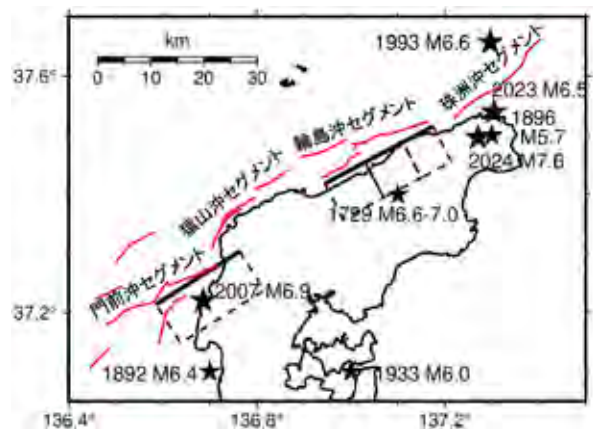


図3. 能登半島北部の被害地震（黒星）と北岸沖の海底活断層（セグメント）（赤線）の分布。

圧力軸を持つ逆断層型（横ずれを伴う）であり、その節面の1つは南東傾斜である⁽⁷⁾。これは、この地域でこれまでに発生した地震のメカニズムと同様であり、能登半島北岸沖合の海底活断層の傾斜方向とも一致する。M7.6の地震とこれらの海底活断層との関係を考える上で、M7.6の地震以前の群発地震活動が重要である。次章では、この群発地震活動について概観しよう。

3. 能登半島北東部での群発地震活動

M7.6の地震の震源地である能登半島北東部では、2018年中頃から地震数が増加し、2020年12月頃から地震活動が活発になった。地震活動域は南部、西部、北部、東部の順に拡がり、これら4つの領域に区分される（図4）。各領域でも地震活動域の拡大が見られ、西部、北部、東部の領域では、深部から浅部（南東から北西）への震源移動が顕著であった。一方、南部の領域では、深さ15

km以深での間欠的な地震発生が特徴的である⁽⁸⁾。震源再決定結果から、西部、北部、東部の領域では、主に複数の南東傾斜の震源分布が確認された。これは、主として南東傾斜の複数の断層面で地震が発生していることを意味する（図5）。さらに、時空間的な震源移動は流体の拡散モデルに整合的であることが示された^{(8),(9)}。また、電磁気学的な比抵抗構造⁽¹⁰⁾や地震波速度構造⁽¹¹⁾の特徴から、南部の15 km以深は水のような流体に富む領域であると解釈されている。

これらの特徴から、南部の地震活動域の15 km以深の領域から水のような流体が上昇し、その流体が南東傾斜の断層に浸透し、潤滑油のように働くことによって、西部・北部・東部の地震活動を活発化させたと考えられている^{(8),(9)}。これは、南部の15 km以深の地震は正断層型や横ずれ型のメカニズム、西部・北部・東部の地震は広域応力場に合う南東傾斜の節面を持つ逆断層型のメカニズムを示すことと整合的である⁽¹²⁾。南部の15 km以

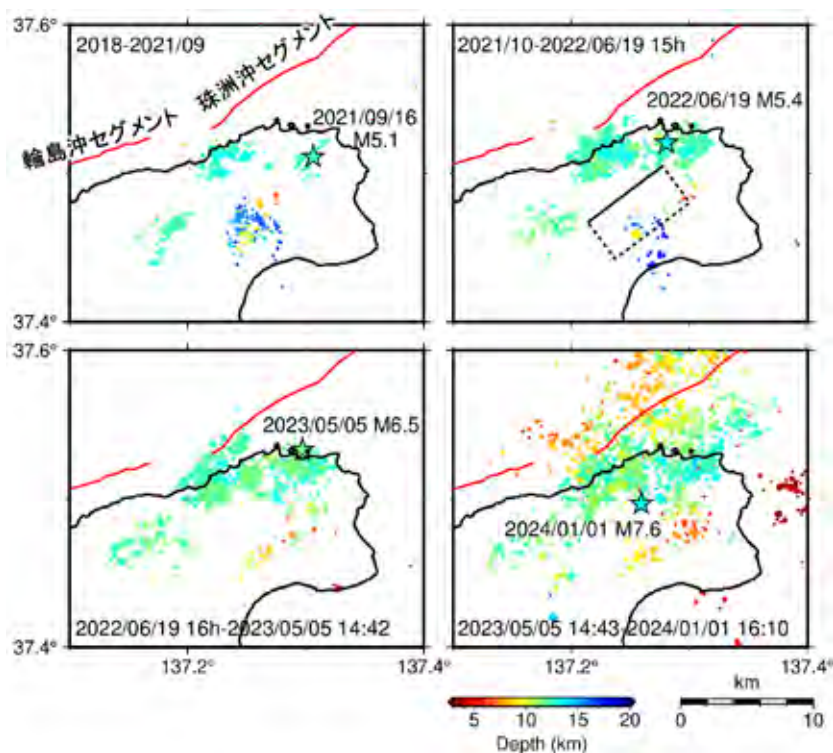


図4. 震源再決定による能登半島北東部の群発地震の震源分布（M1.5以上）。右上図中の矩形は Nishimura et al. (2023) の Period C における地殻変動源のせん断開口断層を表す。

深の地震が円環状の分布を示すこと（図4左上）やその地表付近には重力異常からカルデラ状の地下構造が推定されること⁽¹³⁾などから、日本海拡大時の火山活動に関連した構造（岩脈や火道等）を通り道として、水のような流体が上昇したと考えられる。

2023年5月5日に発生したM6.5の地震は、それまでの東部の地震活動域の浅部端付近を震源とする逆断層型の地震である。その余震（後発地震）の震源分布は、それ以前の地震の震源分布の浅部延長上に位置し、それ以前の東部の地震の断層面の延長上にM6.5の地震の断層面が位置することを表している（図5：断面5）。これは、これまでの一連の地震活動に関わる疑問、すなわち南東に傾斜する海底活断層（例えば珠洲沖セグメント）に関連する活動か否かに答えるものであった。図5の断面5に示すM7.6の地震以前の震源分布（青丸）は海底活断層につながるものではなく、それらの地震が伏在する断層で起こっていたことを示している。このことは、海底活断層における地震発生リスクが高まったままであることも意味し、M6.5の地震後には市民向けシンポジウム等で沖合の海底活断層でのさらなる大地震や津波に対する注意喚起がなされていた⁽¹⁴⁾。

4. 群発地震活動と同期した地殻変動

2020年12月頃から活発化した地震活動は非定常地殻変動を伴い、臨時GNSS観測等による地殻変動データの解析から、珠洲市を中心に水平方向に放射状に拡がり、上下方向に隆起する地殻変動が確認された⁽¹⁵⁾。このような非定常地殻変動を伴う群発地震活動は能登半島のような非活火山地域では稀である。2020年12月から2023年のM6.5の地震前までの地殻変動量は水平方向で最大約3cm、隆起量は最大約6cmであった。この地殻変動に対して、2021年3月頃までは南東傾斜の断層面の開口、それ以降2022年6月頃までは南東傾斜の断層の開口と逆断層型のスロースリップが同時に起きる変動源のモデルが推定されている⁽¹⁵⁾。

変動源は地震の空白域に位置し（図4右上の図中の矩形：2021年6月から2022年6月の期間で推定された変動源の断層位置）、変動源である南東傾斜の断層の浅部側に地震を起こしている断層が位置する。この変動源は、周囲で歪の増減を生じ、断層運動を促進または抑制する力を周囲の断層に与える。西部、北部、東部の地震活動域はこの変動源によって断層運動を促進する力が増加した領域、すなわち地震の誘発域に対応する⁽¹⁵⁾。つまり、地殻変動の変動源が群発地震活動の原因となって

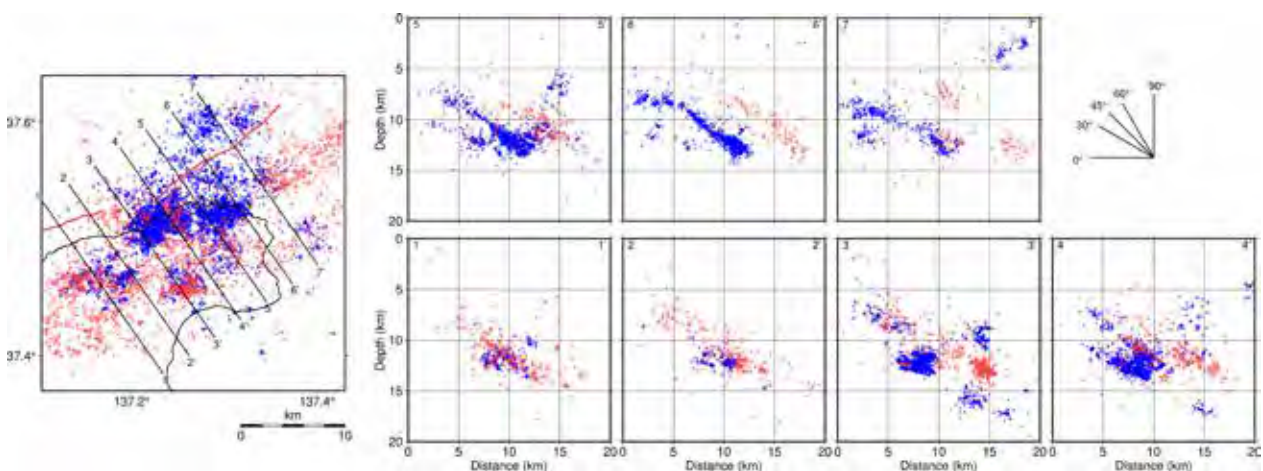


図5. 断層を横切る測線での鉛直断面での震源分布（青丸は2024/01/01 16:00以前の地震、赤丸は以後の地震）。

いることが明らかとなった。断層面の開口やスロースリップは通常地震（断層の速いせん断すべり）では生じず、断層に高間隙圧の流体が浸透していると考えられる。ちなみに、地殻変動データの解析から推定された2020年12月から2022年6月までの期間に地下深部から上昇した流体の総量は約2900万 m³（東京ドーム約23個分）である。

5. 令和6年能登半島地震の発生メカニズム

本章では、3章の群発地震活動と4章の地殻変動の解析結果を踏まえて、M7.6の地震の発生メカニズムに迫ってみよう。震源再決定結果（図5）を見ると、M7.6の地震の震源の東側に位置する断面5-7では、M7.6の地震の余震（後発地震）はそれ以前の地震の震源より浅部にほぼ平行に南東傾斜で分布し、西側の断面1-2ではそれ以前の地震の震源と重なる。断面3の余震分布を通じて、西部と東部の群発地震（M6.5の地震の余震を含む）の震源分布は繋がるように見え、これらの地震が伏在断層上で起こっていることを示唆する。震源再決定結果から、本震震源もこの伏在断層上に位置すると考えられる⁽¹⁶⁾。震源の東側の余震分布は珠洲沖セグメント付近へ、西側の余震分布は輪島沖セグメント付近へ延びており、海底活断層が震源断層であることを示唆する。海上保安庁による海底地形調査でも、能登半島北岸沖の海底活断層の南側の海底が約3 m隆起したことが報告され⁽¹⁷⁾、海底活断層が震源断層であることを支持する。

また、M7.6の地震の震源は、それ以前の地震の活動域の深部側かつ非正常地殻変動の変動源の浅部側に位置する（図6）。すなわち、変動源が与える力と流体の影響を強く受ける場所にM7.6の地震の震源は位置する。したがって、これら2つの作用により、M7.6の地震の震源を含む断層でのすべりがトリガーされた可能性が考えられる。

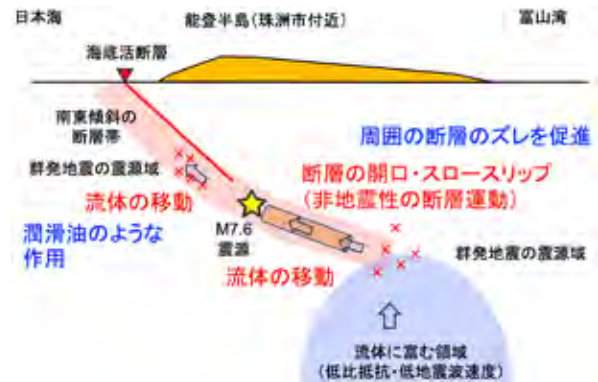


図6. 令和6年能登半島地震の発生過程の概念図（Nishimura et al. (2023) の概念図を改変）。

では、なぜこのすべりが震源付近の海底活断層やさらにその隣の海底活断層へと広がっていったのだろうか。

震源付近には、珠洲沖セグメントと輪島沖セグメントが位置する。これらの海底活断層のM7.6の震源に近い部分では非正常地殻変動の変動源により、断層を動かそうとする力が働き続けていた。また、震源域西側に位置する断層帯、すなわち猿山沖セグメントと輪島沖セグメントの西部には2007年能登半島地震により、やはり断層を動かそうとする力が働いていた。つまり、M7.6の地震の震源周辺およびその西側では断層破壊が連鎖しやすい条件が整えられていたと考えることができよう。そのため、震源付近で始まった断層破壊が複数の海底活断層に次々と伝播し、最終的にM7.6という規模に達する断層破壊が生じたと考えられる。

M7.6の地震では、震度7を記録する強い揺れの他にも海岸の地盤隆起で代表される地殻変動や大きな被害をもたらした津波が観測されている。特に珠洲市狼煙町から輪島市門前町にかけての海岸では最大約5 mに達する大きな地盤隆起が観測された（写真1）。能登半島北岸での数m以上の隆起は、津波の浸水を防ぐ要因、言わば天然の防波堤にもなった。なお、輪島沖セグメントの範囲に対応する海岸での地盤隆起の高低の分布は1729年の地震のものとは異なり、1729年の地震で



写真1. 令和6年能登半島地震前後の輪島市輪島崎町鴨ヶ浦の様子。(左)2022年9月29日撮影、(右)2024年3月16日撮影。

すべり量が小さかった断層がM7.6の地震では大きくすべったことが示唆される。

M7.6の地震の断層破壊過程（断層上のすべり分布）については、地震や地殻変動、津波等の様々なデータに基づいて報告されつつある。図7に京都大学防災研究所の研究グループによる強震波形から推定された断層すべり分布⁽¹⁸⁾を示す。このモデルでは2枚の断層面を設定し、まず南西側にすべりが伝播し、その13秒後に北東側へのすべりの伝播が始まった。つまり13秒の時間差でモーメントマグニチュード7.3の地震が2つ発生したと見ることができる。南西側と北東側の断層浅部での大きなすべりは、能登半島北西部での大きな海岸隆起と珠洲市や能登町で大きな被害を及ぼした津波の原因となる海底での地殻変動をそれぞれ生じた。

この震源を挟んで両側に位置する大すべり域は、M7.6の地震での建造物被害や液状化被害をもたらした継続時間の長い強い揺れの原因でもある。実際、震度7を記録した1995年兵庫県南部地震の鷹取と2016年熊本地震の西原での速度波形記録と比較すると、M7.6の地震の正院や穴水では10秒以上にわたり、振幅が100cm/sを超える強い揺れが継続していることが分かる（図8）。

また、この揺れは能登半島の多くの地点で斜面崩壊を起こし、道路網の寸断のため能登半島の多

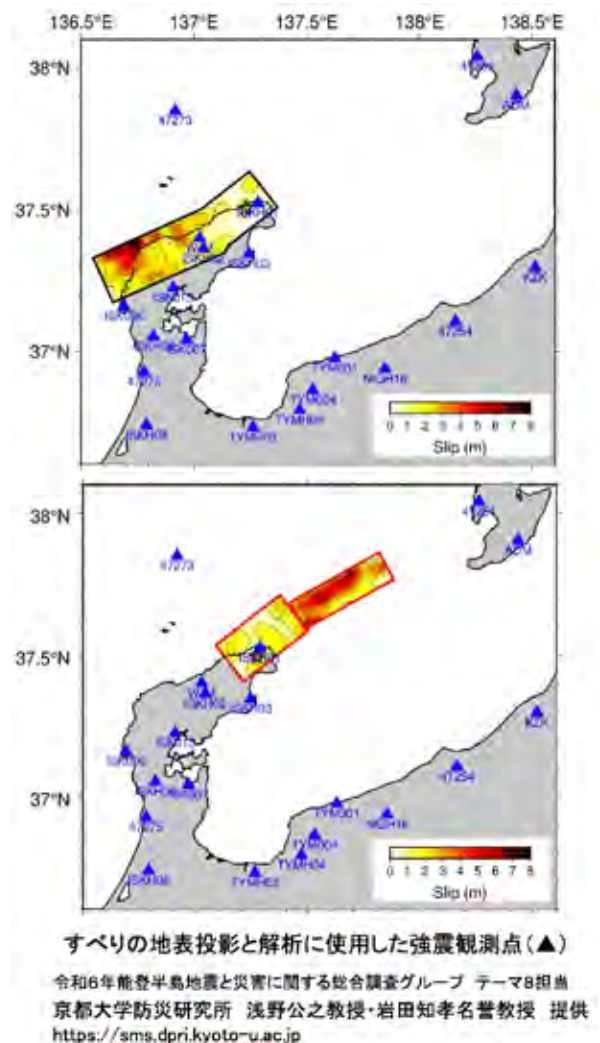


図7. 強震波形記録から推定された（上）南西側の断層面、および（下）北東側の断層面におけるすべり分布。

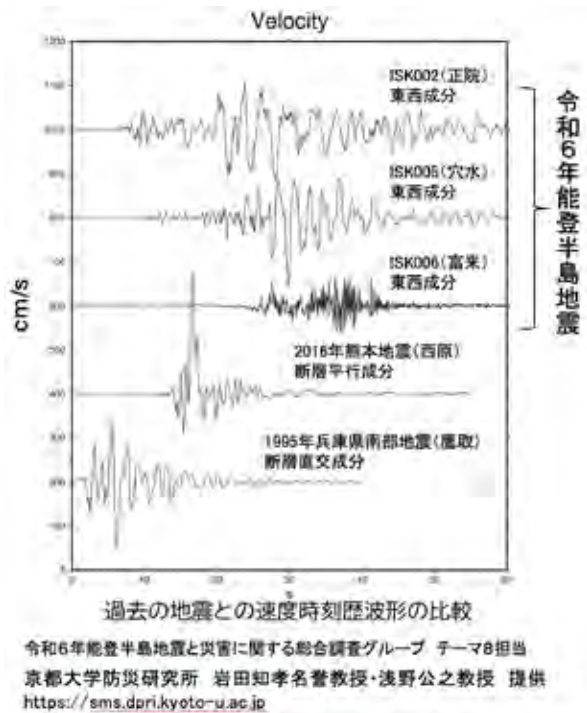


図8. 震度7を記録した過去の地震と令和6年能登半島地震の速度波形の比較。

くの場所で孤立集落が生じた。2007年能登半島地震の際にも輪島市門前町深見地区が孤立したが、住民は船で避難することができた。しかし、M7.6の地震に伴う海岸での地盤隆起や津波は港湾機能を喪失させ、港からの脱出手段を奪うとともに救援の手段をも奪うこととなった。日本の沿岸部で、将来起こる大地震により同様の被害が生じないような対策の実施や孤立を前提とした備蓄体制の強化が求められる。

6. おわりに

本稿では、能登半島北部の過去の地震や2020年12月頃から能登半島北東部で流体によって駆動された群発地震活動や非常地殻変動を含めて、令和6年能登半島地震に至る過程を解説した。令和6年能登半島地震は、能登半島北岸沖合の海底活断層が、流体の作用（地殻変動の変動源による応力変化の影響を含む）を原因としてずれ動き、断

層破壊の連動によりM7.6の規模に達した。プレート境界の巨大地震で想定されるスロースリップと大地震の発生に関連性に関わる研究の一層の進展が望まれる。また、この地震に伴う強い揺れや土砂災害、津波等により広域で被害が生じた。特に道路被害や港湾機能の喪失により多くの孤立集落が生じた。沿岸部や山間部における集落の孤立対策やその備えのさらなる充実が必要である。

【参考文献】

- (1) 石川県危機対策課 (2024) 被害等の状況について (第137報), <https://www.pref.ishikawa.lg.jp/saigai/documents/higaihou137.pdf>
- (2) 日本海における大規模地震に関する調査検討会 (2016) 日本海における大規模地震に関する調査検討会. https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinchousa/
- (3) 日本海地震・津波調査プロジェクト (2021) 令和2年度「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/Japan_Sea/JSR2Report/
- (4) 井上卓彦, 岡村行信 (2010) 能登半島北部周辺20万分の1海域地質図説明書, 海陸シームレス地質情報集, 能登半島北部, 数値地質図 S-1.
- (5) Hiramatsu, Y. et al. (2008) Fault model of the 2007 Noto Hanto earthquake estimated from coseismic deformation obtained by the distribution of littoral organisms and GPS: Implication for neotectonics in the northwestern Noto Peninsula, *Earth Planets Space*, 60, 903-913.
- (6) Hamada, M. et al. (2016) Fossil tubeworms link coastal uplift of the northern Noto Peninsula to rupture of the Wajima-oki fault in AD 1729, *Tectonophysics*, 670, 38-47.
- (7) 気象庁 (2024) 令和6年1月1日16時10分頃の石川県能登地方の地震について. <https://www.jma.go.jp/jma/press/2401/01a/kaisetsu202401011810.pdf>
- (8) Amezawa, Y. et al. (2023) Long-living earthquake swarm and intermittent seismicity in the northeastern tip of the Noto Peninsula, Japan. *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL102670.
- (9) Yoshida, K. et al. (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.

- Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 128, e2022JB026047.
- (10) 吉村令慧・他 (2023) 能登群発地震域周辺の地下比抵抗構造とその不均質性, 日本地震学会2023年秋季大会, S22-02.
- (11) Okada, T. et al. (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.
- (12) 高野彩香, 平松良浩, 行竹洋平 (2023) 能登半島北東部の群発地震活動領域の震源メカニズム解と応力場, 日本地震学会2023年秋季大会, S22P-04.
- (13) 澤田明宏, 平松良浩 (2022) 能登半島北東部の活発な地震活動の震源域に見られる低重力異常域の地質構造, 日本地球惑星科学連合2022年大会, SCG52-P16.
- (14) 平松良浩 (2024) 火山防災協議会念頭に、2年前からトップとの意見交換や住民対象シンポ, 日本災害情報学会ニュースレター, 97, 3-3.
- (15) Nishimura, T. et al. (2023) Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan. Scientific Reports 13, 8381.
- (16) 吉田圭佑・他 (2024) 2024年 Mw7.5能登半島地震の震源断層において数年間継続した微小地震のマイグレーションと本震の発生過程, 日本地球惑星科学連合2024年大会, U15-P11.
- (17) 海上保安庁 (2024) 能登半島沖の海底で約3メートルの隆起を確認. <https://www.kaiho.mlit.go.jp/info/kouhou/r6/k240208/k240208.pdf>
- (18) 浅野公之, 岩田知孝 (2024) 強震波形による2024年能登半島地震の震源破壊過程, 日本地球惑星科学連合2024年大会, U15-P20.

・謝辞

本稿で述べた研究成果の多くは科学研究費助成事業（特別研究促進費）22K19949と23K17482で得られました。現地での調査・観測では地元の自治体・住民・関係機関の方々に多大なるご協力・ご支援をいただいた。震源再決定には防災科学技術研究所のウェブサイトにて公開されている地震データを用いました。令和6年能登半島地震でお亡くなりになられた方々に深く哀悼の意を表すとともに、被災された方々に心よりお見舞い申し上げます。