

能登半島北東部の群発地震と令和6年能登半島地震

平松 良浩
(金沢大学)

1. はじめに

2024年1月1日16時10分に石川県珠洲市を震源として令和6年(2024年)能登半島地震(M7.6, 最大震度7)が発生し、地震動や津波により甚大な被害が生じた。震源地である珠洲市付近では、令和6年能登半島地震に先立ち局所的な地殻変動を伴う群発地震活動が数年に渡り継続し、この群発地震の震源域に令和6年能登半島地震の震源も位置する。これらの一連の活動の成因を解明するために様々な調査観測が実施されている。本解説では、能登半島北東部の群発地震および令和6年能登半島地震について、地球物理学的な調査結果を中心に紹介する。

2. 群発地震：地震活動

能登半島北東部では、2018年半ばから地震数が増加し、2020年12月頃からさらに活発化し、群発的な地震活動が継続していた。能登半島北東部の群発地震の精密震源決定結果(図1)から、以下のことが明らかとなった(e.g. Amezawa et al., 2023; Yoshida et al., 2023a)。(1)群発地震の活動域は4つの領域(クラスター)に区分され、南クラスターから始まった活動は、西、北、東クラスターへと順に拡大した。(2)西、北、東クラスターは主に複数の南東傾斜の震源分布を示し、複数の南東傾斜の断層が推定される。(3)各クラスターで流体圧拡散モデルに従う震源移動が認められ、西、北、東クラスターでは拡散定数が約 $10^{-1}(\text{m}^2/\text{s})$ であり、南東傾斜の断層帯中を流体が上昇した。(4)南クラスターは15 km以深の間欠的な地震活動が特徴的であり、その震源移動は $\sim 10^2(\text{m}^2/\text{s})$ の拡散定数で説明でき、間欠的な大量の流体上昇を示唆する。(5)南クラスターの15 km以深の震源は円環状の分布を示し、また南クラスターはカルデラ状の地下構造が推定される低重力異常域であること(澤田・平松, 2022)から、日本海拡大期の火山活動に関連した構造を用いて、南クラスターでの流体上昇や地震活動が発生していると考えられる。

2023年5月5日には東クラスターの震源域の上端付近でM6.5の地震が発生した。M6.5の地震の精密余震分布から、一連の群発地震が発生している断層は、能登半島

北岸沖合の海底活断層とは異なる伏在断層であることが明らかとなった(Yoshida et al., 2023b; Kato, 2024)。この結果は、海底地震観測結果からも支持される(蔵下・他, 2024)。3次元地震波速度構造として、南クラスターの15 km以深の領域は高 V_p 、低 V_s 、高 V_p/V_s を示し、流体の存在を示唆する(Okada et al., 2024)。

3. 群発地震：非正常地殻変動

群発地震活動が活発化した2020年12月頃から、能登半島北東部では局所的に非正常地殻変動が観測された。群発地震の震源域周辺での臨時GNSS観測等の結果、震源域から放射状に広がる水平変位と震源域周辺での隆起が確認された。その変動源は非地震性の断層運動、すなわち南東傾斜した断層でのゆっくりとした開口と逆断層型の断層運動(スロースリップ)により説明され、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 m^3 と推定されている(Nishimura et al., 2023)。この変動源は南クラスターと他のクラスター間の非地震活動域に位置する。この変動源による歪

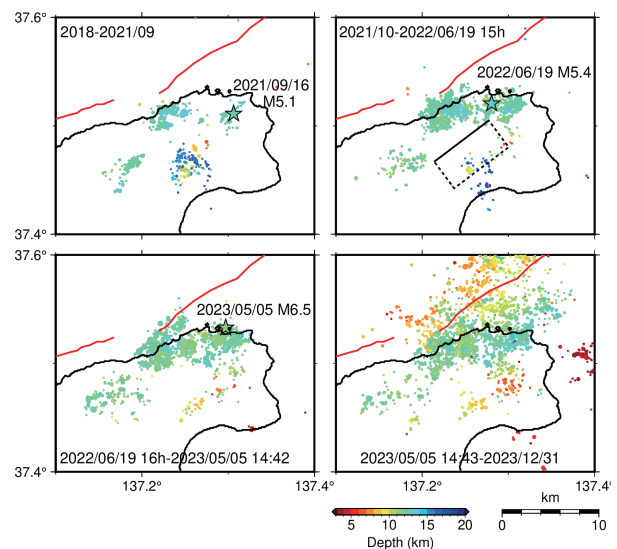


図1 能登半島北東部の群発地震活動(M1.5以上、hypoDD(Waldhauser and Ellsworth, 2000)による精密震源決定結果)。右上図中の矩形はNishimura et al. (2023)のPeriod Cにおける地殻変動源のせん断開口断層を表す。

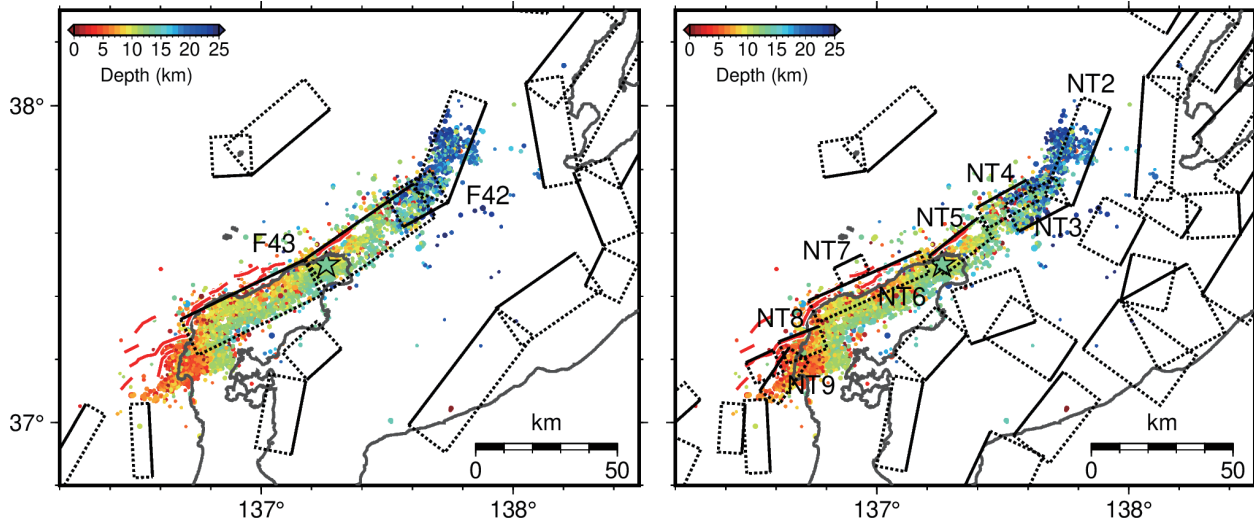


図2 令和6年能登半島地震の余震（M2.0以上、hypoDD(Waldhauser and Ellsworth, 2000)による精密震源決定結果）と既往断層モデルの関係。（左）日本海における大規模地震に関する調査検討会による断層モデル、（右）日本海地震・津波調査プロジェクトによる断層モデル。

変化により、浅部の断層帯では逆断層型の断層運動を促進する力が働き、断層への流体の浸透とともにこの力により、群発地震活動が長期間継続した。

4. 群発地震：電磁気観測

地下の流体の分布を調べるために、2021年と2022年の冬季に群発地震震源域周辺で臨時電磁気観測が実施された。また、2022年、2023年、2024年には沿岸域での海底電磁気観測が実施された。陸域での観測データの解析から、主として南クラスターの15 km以深に低比抵抗領域が分布することが示され、流体に富む領域であると解釈される（吉村・他, 2024）。また、西、北、東クラスターの地震活動の震源域はこの低比抵抗領域の上端外縁部に位置する。これらより、一連の群発地震活動への流体の関与、つまり南クラスター深部から流体が上昇し、他のクラスターへ移動したことが示唆される。

5. 令和6年能登半島地震

令和6年能登半島地震の震源は群発地震の震源域に位置し、その余震は約150 kmの範囲に分布する（図2）。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ではF43とF42、日本海地震・津波調査プロジェクトによる断層モデルではNT2からNT9が概ねこの余震分布に対応している（図2）。余震分布は、その北東部を除いて、南東傾斜を示し、海底地震計を用いた観測結果（篠原・他, 2024）等から能登半島北岸沖合の海底活断層が震源断層であると考えられている。余震の精密

震源決定結果から、震源付近の本震および余震の震源は一つの面上に分布し、群発地震の東クラスター（2023年のM6.5の地震の本震及びその余震）や西クラスターの地震もその面上に位置する。この面は能登半島北岸沖の海底活断層の深部延長には位置せず、群発地震を起こしていた地下の伏在断層で本震の断層破壊が起こったことが示唆される（Yoshida et al., 2024）。すなわち、令和6年能登半島地震は断層への流体の浸透と非地震性の断層運動の両方の影響を受け、励起されたと考えられる。

この断層破壊が海底活断層の断層面へ連鎖的に伝播し、最終的にM7.6の地震規模となった。令和6年能登半島地震の震源過程の推定は地震波形データ、地殻変動データ、津波波形データ等を用いて多くなされている。浅野・岩田（2024）は強震波形を用い、余震分布に基づき2枚の断層面を設定し、まず南西側への破壊が起こり、その13秒後に北東側への破壊開始が生じたことを報告している。南西側の断層面での輪島市門前町付近及び北東側の断層面での能登半島北東沖での断層浅部での大きなすべりは、能登半島北西部の海岸での最大約5 mに達する地盤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。

GNSS観測からは能登半島北部を中心に地震時変位として、西向きに最大2 m程度の水平変位、能登半島の北岸で最大2 m程度の上下変位が記録された。余効変動としては令和6年能登半島地震後4ヶ月間で水平方向に最大約3 cm、上下方向では最大約6 cmの沈降が観測され、マンツルの粘弾性緩和が主要因であると考えられている（西村・他, 2024）。

令和6年能登半島地震の断層運動により、震源域周辺

の断層帯ではクーロン破壊応力変化の増減により、断層運動が促進される断層帯と抑制される断層帯が生じた。断層運動が促進される断層帯としては、佐渡島周辺、石川県西方沖の海域、石川県や富山県の平野部の断層帯等が挙げられる。

6. 謝辞

本解説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, 23K17482）で得られた。現地での調査・観測では地元自治体・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。記して感謝する。

参考文献

- Amezawa, Y. et al. (2023) Long-living earthquake swarm and intermittent seismicity in the Northeastern tip of the Noto Peninsula, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2022GL102670.
- 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.
- Kato, A. (2024) Implications of fault-valve behavior from immediate aftershocks following the 2023 Mj6.5 earthquake beneath the Noto Peninsula, Central Japan. *Geophys. Res. Lett.*, 51, e2023GL106444.
- 蔵下英司・他 (2024) 能登半島北東部の群発地震活動域における精密震源分布と地殻構造, 日本地球惑星科学連合2024年大会, SSS09-01.
- Nishimura, T. et al. (2023) Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, Central Japan. *Sci. Rep.*, 13, 8381.
- 西村卓也・他 (2024) 2020-2024年の能登半島地震活動に伴う地殻変動, 日本地質学会第131年学術大会, S-O-2.
- 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 and Space*, 76, 24.
- 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.
- 篠原雅尚・他 (2024) 海底地震計を用いた令和6年能登半島地震の緊急海底観測による余震分布, 日本地球惑星科学連合2024年大会, U16-P14.
- Waldhauser, F., Ellsworth, W.L. (2000) A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 90, 1353-1368.
- Yoshida, K. et al. (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, e2022JB026047.
- Yoshida, K. et al. (2023b) Updip fluid flow in the crust of the Northeastern Noto peninsula, Japan, triggered the 2023 Mw 6.2 Suzu earthquake during swarm activity. *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2023GL106023.
- Yoshida, K. et al. (2024) Role of a hidden fault in the early process of the 2024 Mw7.5 Noto Peninsula earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 51, e2024GL110993.
- 吉村令慧・他 (2024) 2024年能登半島地震震源域周辺の3次元比抵抗構造, 日本地球惑星科学連合2024年大会, U15-P56.