

# 令和6年能登半島地震に先行して長期継続した群発地震

雨澤 勇太<sup>1</sup>

## 1. はじめに

2024年元旦、能登半島北東部を震源とする令和6年能登半島地震（マグニチュード7.6）が発生し甚大な被害が生じました。一方、能登半島北東部ではこの地震に先立って2018年5月ごろから群発地震が長期継続しており、その駆動要因として、地殻内に存在する流体の影響が指摘されていました。本稿では、まず群発地震という現象について簡単に紹介した後、能登半島北東部の群発地震について、地震活動の詳細な解析を基軸に群発地震のメカニズムを考察した研究成果（Amezawa *et al.*, 2023）を関連する他の研究成果と併せてご紹介いたします。

## 2. 群発地震—駆動メカニズムとその継続時間—

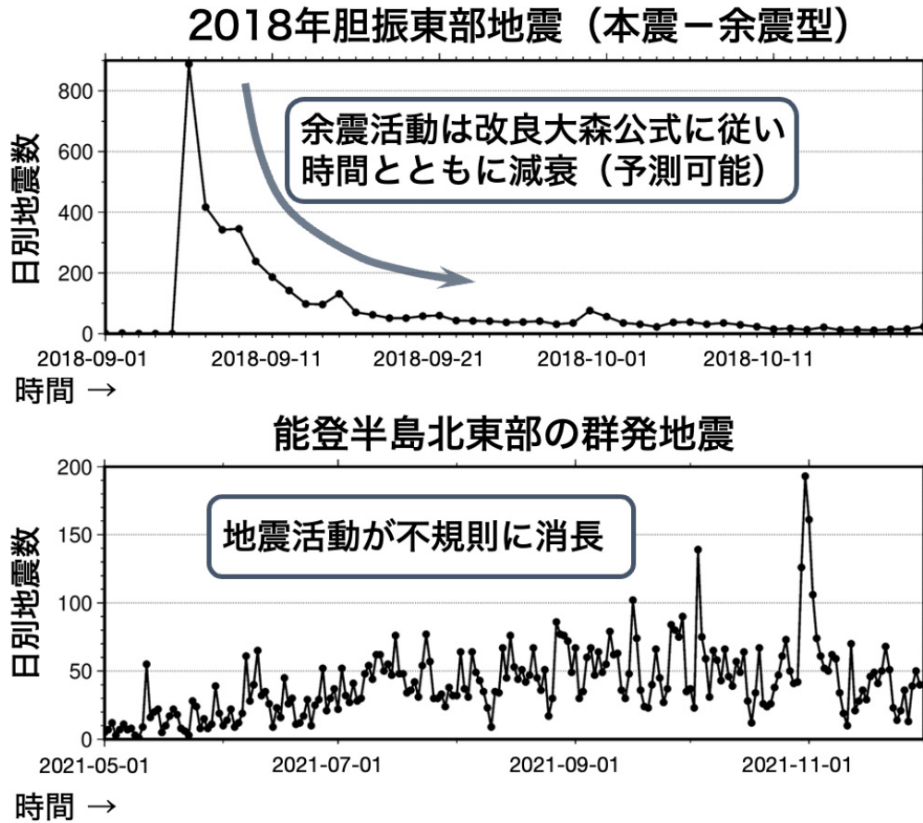
群発地震とは、地震活動の初期に本震（最大規模の地震）が発生せず、地震数や地震の規模が不規則に変化するような地震活動が、ある地域で一定期間継続するような現象です。本稿では「群発地震」を現象名、「群発地震活動」を群発地震による地震活動と定義します。群発地震は火山・地熱地帯・人工注水の坑井周辺で多く観測されます。群発地震の駆動メカニズムとして、水やガスを主とする高压の流体が弱面へ浸入することによる有効法線応力（弱面を押さえ付ける力）の低下やマグマ陥入・非地震性滑りによる局所的な応力場の変化が考えられてきました（例えば、Shelly *et al.*, 2016；Toda *et al.*, 2002；Dublanche and De Barros, 2020）。群発地震は以上のような外的要因の時空間変化によって駆動されるため、「震源マイグレーション」（地震活動の時空間発展）を伴うことがあります。特に、シェールガスなどの地下資源掘削のために行われる人工注水に伴って発生する群発地震に関して、拡散的な震源マイグレーションが観測され、地下における流体圧の拡散と群発地震活動の時空間発展の関係が明らかにされてきました（例えば、Shapiro *et al.*, 1997；Shapiro and Dinske, 2009；Goebel and Brodsky, 2018）。また、世界各地の群発地震につい

て、震源マイグレーションの拡散係数が推定され、群発地震活動の時空間発展の速さを表す特徴量として比較研究が行われてきました（例えば、Chen *et al.*, 2012；Amezawa *et al.*, 2021；Danré *et al.*, 2022）。

以上のように、群発地震の駆動メカニズムについて理解が深まってきた一方、群発地震の継続時間については依然として未解明な部分が多く残されています。典型的な地震活動パターンである本震-余震型の場合、その余震発生数は時間と共に改良大森公式という統計則にしたがって減少するため、余震活動の継続時間は予測可能です（第1図）。しかし、群発地震では改良大森公式に従わないような地震活動となるため、その継続時間を見通すことは極めて困難です。また、駆動メカニズムが同様な群発地震であっても、その継続時間は多様で、数日程度で終了するものから数年継続するものもあります。例えば、世界的に有名な松代群発地震は1965年から1967年にわたって継続し、終盤には地下からの大量の湧水を伴ったことから、高压の流体によって駆動されたと考えられています（例えば、Cappa *et al.*, 2009）。一方、2009年に箱根で発生した群発地震では、松代と同様に高压な流体が関与したと考えられていますが、8日程度で終了しています（Yukutake *et al.*, 2011）。本稿で解説する能登半島北東部の群発地震も高压な流体が関与したと考えられていますが、4年以上も長期継続しています。近年、群発地震の継続時間の規定要因を知る手掛かりの1つとして、震源マイグレーションの速さと継続時間との間に逆相関関係が発見され（Amezawa *et al.*, 2021；Danré *et al.*, 2022）、岩石の浸透率などが群発地震の継続時間に大きく影響している可能性が指摘されています。しかし、数年にわたって長期継続する群発地震のメカニズムについては不明な点が多く、群発地震の全貌を理解するにあたっての大きな謎となっています。能登半島北東部で長期継続した群発地震は、世界的に最長かつ最大級の群発地震の1つであり、この謎を解明するための重要な手掛かりになり得る現象と言えます。

<sup>1</sup> 東京科学大学理学院 地球惑星科学系 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1

キーワード：能登半島、群発地震、流体

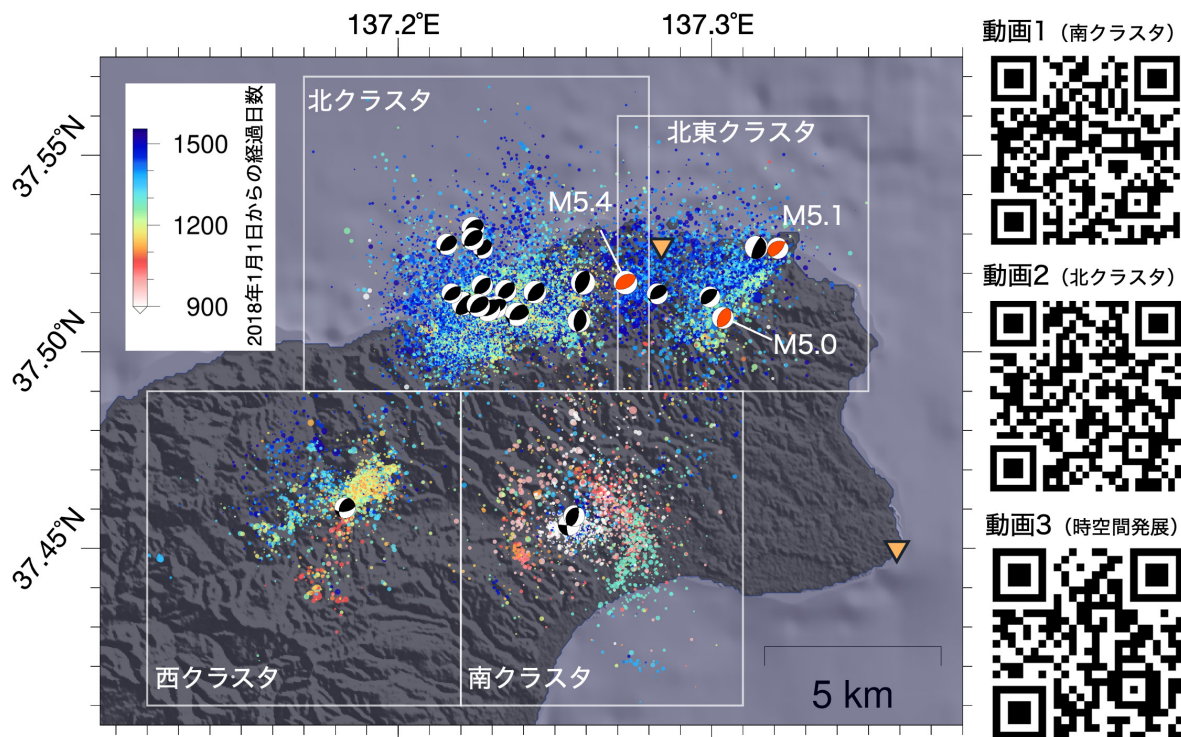


第1図 本震－余震型と群発地震の日別地震数の時系列。

### 3. 能登半島北東部の群発地震活動の特徴

さて、ここからは能登半島北東部の群発地震に話題を移しましょう。本稿では、Amezawa *et al.* (2023) に基づき、2018年5月から2022年6月までの群発地震活動の詳細を主に解説していきます。まずは、群発地震活動の特徴を見ていきたいと思います。動画もありますので、併せてご覧ください(第2図の動画1・動画2では、震源分布の3次元表示をご覧ください)。第2図に、本地域の群発地震活動の空間分布を示します。これを見ると、群発地震活動は空間的に4つの領域(南・西・北・北東(東)クラスタ)に分かれていることが分かります。本稿においては、「クラスタ」という用語を「複数の震源が空間的に密集したもの」と定義します。どのクラスタも震源の深さが10-20 kmと地殻内地震の発生深度としては比較的深いという共通点を持つものの、各クラスタにおける群発地震活動の様相は大きく異なります。一連の群発地震活動の発端となった南クラスタの地震活動は、マグニチュード(M) 2以下の微小地震が主であり、時間的に「間欠的な群発地震活動」を伴うという特徴があります(第3図a)。また、震源が円錐面上に分布するような独

特な震源分布をしています(第2図、動画1)。西クラスタでも同様にM 2以下の微小地震が卓越するものの、ここでは間欠的な群発地震活動は見られませんでした(第3図b)。西クラスタの震央分布はV字ようになっており、北北東-南南西と北東-南西のそれぞれ5 kmほどの空間に板状の震源分布が確認できます。また、2つの板状の震源分布の会合部ではM 3-4級のやや規模の大きな地震も発生しています。北クラスタでは、M 2以下の微小地震に加えてM3-4級の地震が多数発生しています(第3図c)。その震源分布を見ると、走向が北東-南西方向で約45°東傾斜の長さ1 kmほどの面状な震源分布が複数確認できます(第2図、動画2)。令和6年能登半島地震(M7.5)の震源(断層の破壊開始点)はこのクラスタの直上に推定されています。北東クラスタの群発地震活動は2021年7月ごろまではM 2以下の微小地震が主でしたが、その後もなく2021年9月16日にM 5.1、2022年6月19日にM 5.4、2022年6月20日にM 5.0の地震が発生しており、比較的規模の大きな地震が発生しています(第3図d)。2023年5月5日のM 6.5の地震はこのクラスタの浅部延長で発生したと推定されています(Yoshida *et al.*, 2023; Kato, 2024)。



第2図 能登半島北東部の群発地震活動。色付きの丸は2018年1月1日からの地震の震央。黒色および赤色の震源メカニズム解はマグニチュード(M)4以上5未満およびM5以上の地震の防災科学技術研究所F-net CMT解。橙色の逆三角形は定常地震観測点。本図はAmezawa *et al.* (2023) Figure 1を一部改変したものである。動画1は南クラスタの震源分布 (<https://youtube.com/shorts/OiClqYeNVic> 閲覧日: 2024年8月30日)。動画2は北クラスタの震源分布 (<https://youtube.com/shorts/6N3cAzJiDwU> 閲覧日: 2024年8月30日)。動画3は群発地震活動の時空間変化 (<https://youtu.be/JYZgVIVAerM> 閲覧日: 2024年8月30日)。それぞれの動画は、Amezawa *et al.* (2023)のSupporting Information Movie S2, S3, S1と同様のものである。

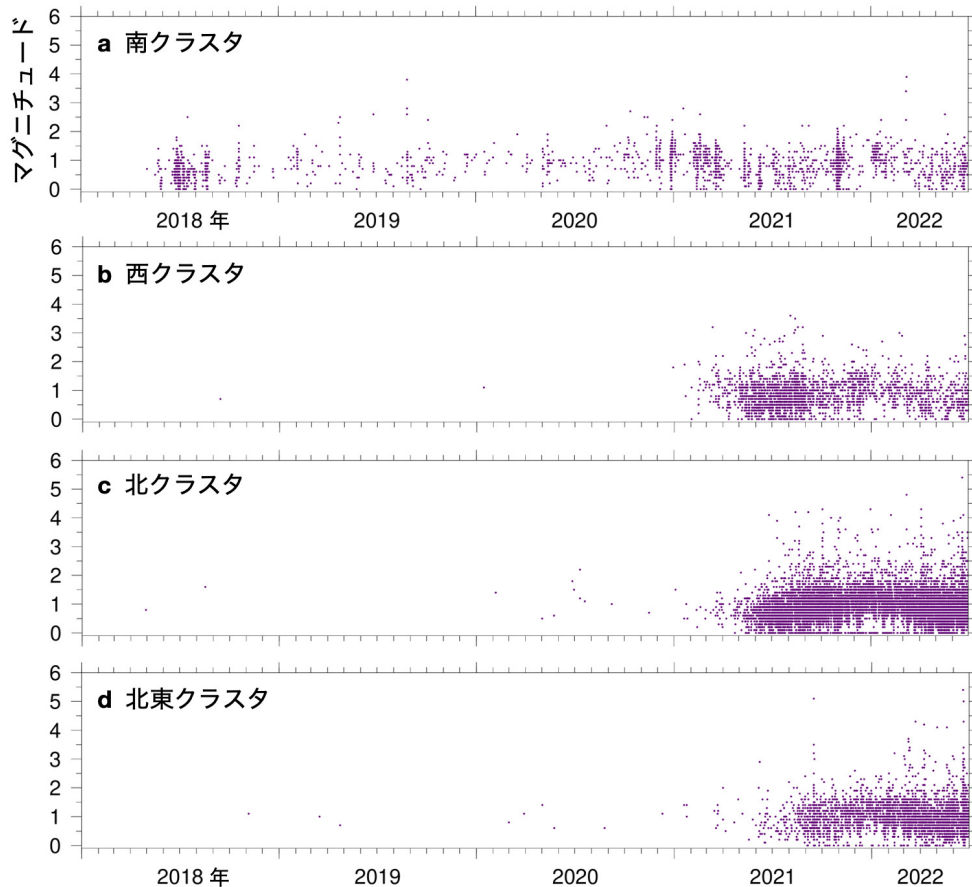
#### 4. 群発地震活動の時空間発展

続いて、群発地震活動の時空間発展を見ていきたいと思います。こちらもぜひ動画をご参照ください(第2図の動画3のQRコード・URL)。まず、2018年5月ごろ、南クラスタの浅部側(深さ10–15 km)において群発地震が発生し、2 km四方ほどの領域でM2以下の微小地震による群発地震活動が半年ほど活発化しました。その後は、地震発生頻度を減少させつつも、南クラスタの同領域とそこから北・北東クラスタにかけての領域で2年ほど継続しました。一転して、2020年11月30日、これまで地震活動が全くなかった南クラスタの深部側(深さ15 km以深)で、突如として活発な群発地震活動が発生しました。その後、西クラスタ、北クラスタ、北東クラスタの順に群発地震活動が発生していきました。

これらの群発地震活動の時空間発展を定量評価するために、間隙流体圧(媒質の間隙に存在する流体による圧力)の等方拡散モデル(Shapiro *et al.*, 1997)をそれぞれのクラスタの群発地震活動について適用し、震源マイグレーションの拡散係数を推定しました。西・北・北東クラスタについ

ては、群発地震活動の全期間に対して拡散的な震源マイグレーションが観測され、それらの拡散係数はいずれも $1.0 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ 程度と推定されました(第4図a, b, c)。世界各地のさまざまなテクトニクス下における群発地震で観測された震源マイグレーションの拡散係数は $4.0 \times 10^{-3} - 5.0 \times 10^0 \text{ m}^2/\text{s}$ (Amezawa *et al.*, 2021)の範囲なので、これらと比較すると能登半島北東部の群発地震について推定された値は、標準～やや小さめの値であると言えます。一般に拡散係数は媒質の浸透率(多孔質物体内の流体での流れやすさ)に比例する量であることから、観測された震源マイグレーションが間隙流体圧の拡散に対応すると仮定した場合、群発地震の発生域の地殻構成物質の浸透率は低めであると言えます。また、震源マイグレーションの開始点は、どのクラスタにおいても南クラスタに近い側に推定されました(第4図d, e, f)。このことは、南クラスタから他クラスタへ流体が供給されたことを意味します。

一方、南クラスタについては全期間的な震源マイグレーションは確認できませんでしたが、各々の間欠的な群発地震活動について拡散的な震源マイグレーションが観測されました。特に、2020年末以降に突然活発化した深部側の



第3図 各クラスタの群発地震活動のマグニチュードの時系列. (a) 南クラスタ, (b) 西クラスタ, (c) 北クラスタ, (d) 北東クラスタについての結果.

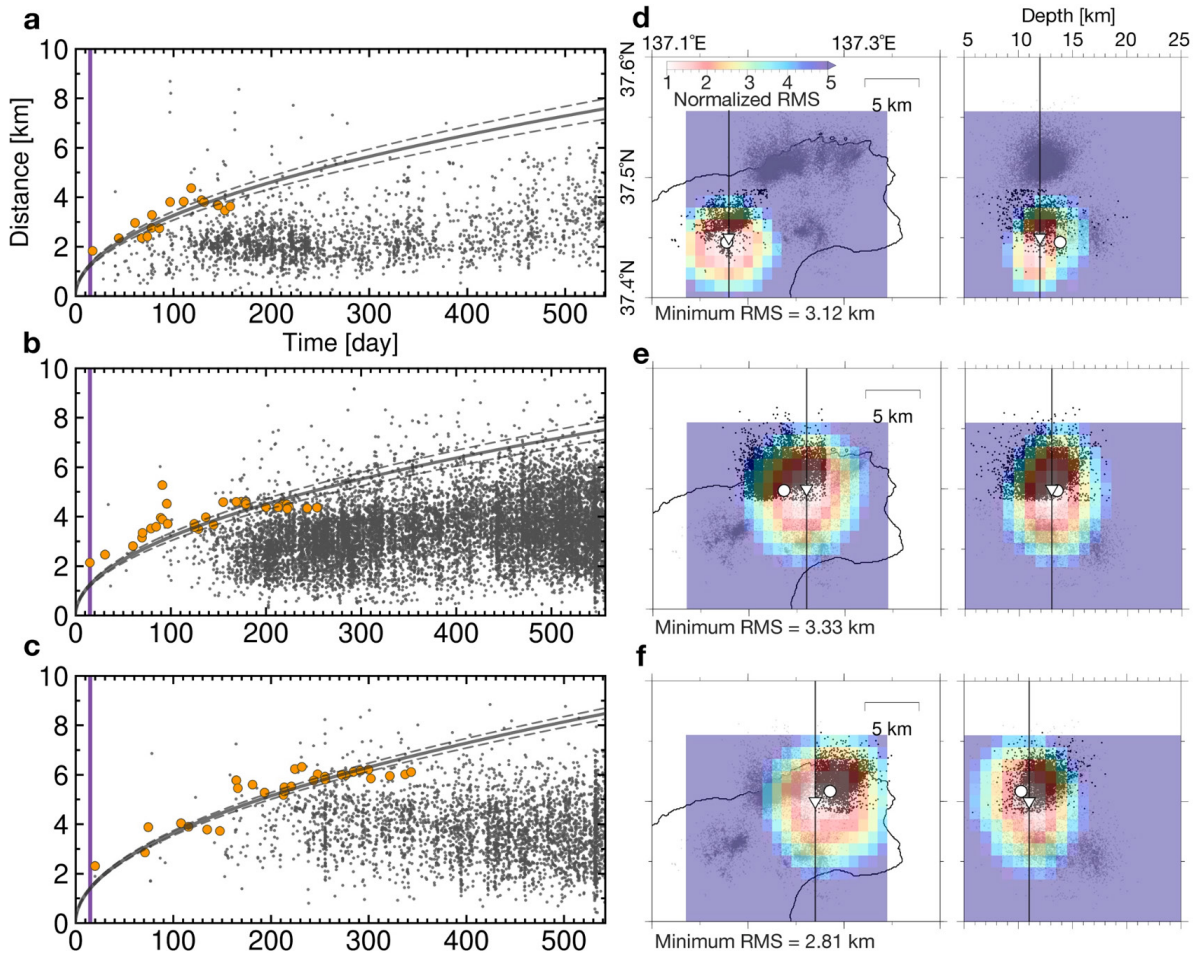
活動に関して、拡散係数のオーダーが  $10^1$ – $10^2$   $\text{m}^2/\text{s}$  という非常に大きな値を示す高速な震源マイグレーションを観測しました(第5図). このことは、南クラスタ深部において浸透率が非常に高いような領域に高压な流体が間欠的に浸入して群発地震活動を伴いつつ移動したことを意味します. また、群発地震活動が間欠的になる理由として、封圧が高いため(深さ 15–20 km で少なくとも 350 MPa)、地震活動の発生に伴って流体が移動すると、間隙流体圧による有効法線応力の低下が断層を破壊するには不十分となることが考えられます. これに加えて、地震発生時の急激な減圧により、シリカが析出することで断層強度が急速に回復する(例えば、Amagai *et al.*, 2019; Ujiie *et al.*, 2018) ことの影響も考えられます.

では、南クラスタの深部側に浸入した流体は、どのように他のクラスタに移動したのでしょうか? 群発地震活動の空間分布を見てみると、南クラスタと他クラスタの間には 5 km ほどの地震活動が低調な領域(ギャップ域)が存在します(第2図). 群発地震活動の時空間発展(第2図, 動画3)を見てみると、南クラスタ深部側における群発地震活

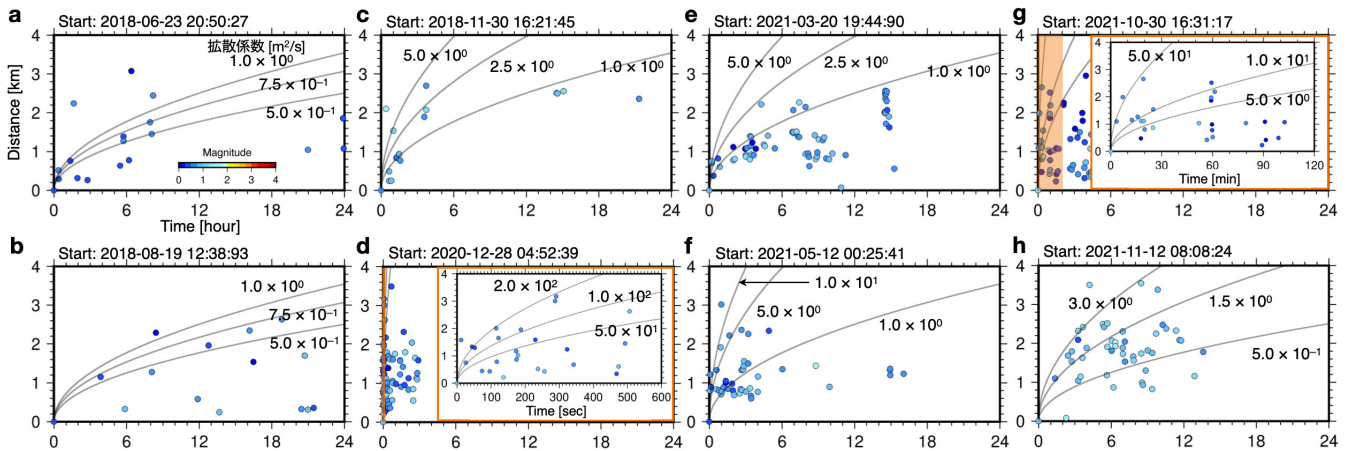
動発生から約 50 日後に他クラスタにおける活動が開始しており、この間にギャップ域を流体が移動したとすれば、ギャップ域の浸透率は標準的な地殻内の値( $5.0 \times 10^{-16}$ – $5.0 \times 10^{-14}$   $\text{m}^2$ ) (Talwani *et al.*, 2007) に対して非常に高く見積もられます( $\sim 10^{-8}$   $\text{m}^2$ ). このような状況が生じる理由として、ギャップ域には水平クラック的な構造があり、高压な流体が南クラスタのさらに深部から供給されて高まった間隙流体圧が、水平クラック的な構造を鉛直方向に押さえ付ける力を超えたことで水平クラックが開いたということが考えられます(第6図). この状況は、群発地震と同時期に観測された非定常地殻変動の解析結果からも指摘されており、ギャップ域にゆるく南東傾斜する水平クラック的な構造が存在し、そこに流体が浸入して非地震性の滑りが発生した可能性も指摘されています(Nishimura *et al.*, 2023).

## 5. 群発地震を駆動した地殻流体

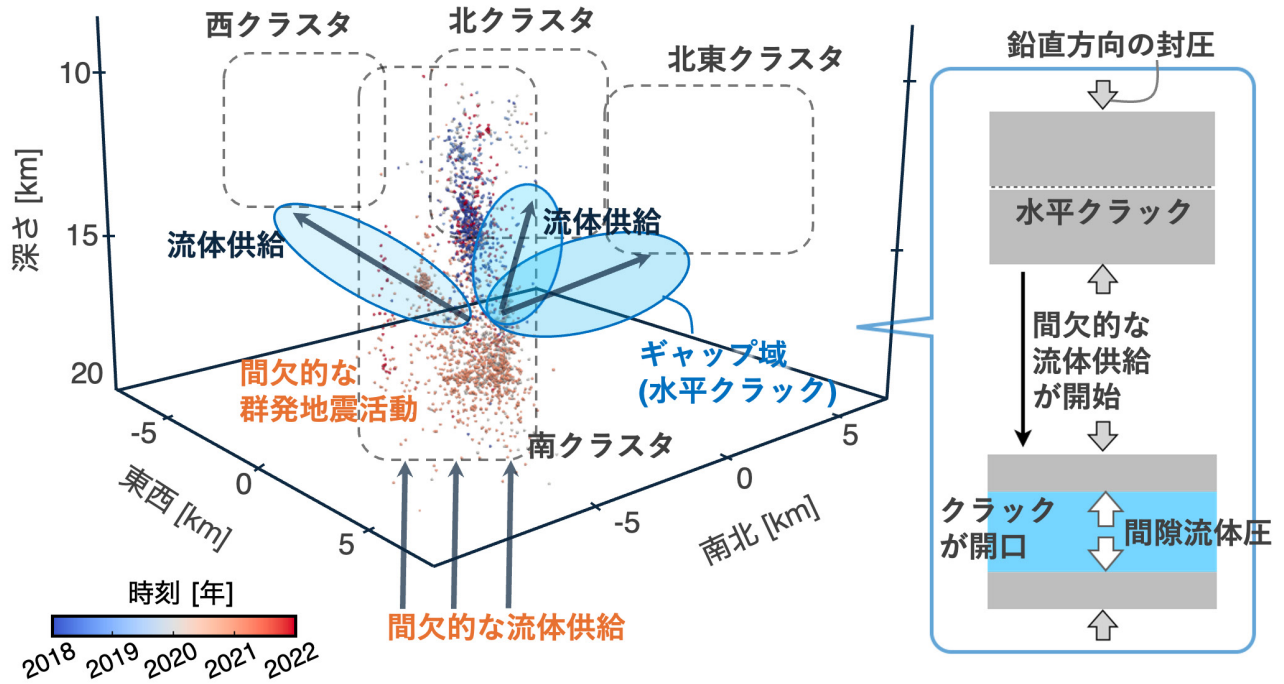
それでは、能登半島北東部の群発地震に関与したと考えられる流体はどこから来たのでしょうか? これまでに、さ



第4図 西・北・北東クラスタで観測された震源マイグレーション. (a) 西・(b) 北・(c) 北東クラスタにおける震源距離に対する時間原点からの経過時間. 橙色の丸は理論拡散曲線の当てはめに使用したデータ. 黒実線は最適解, 破線は最適解の拡散係数 $\pm 2\sigma$ とした場合の理論曲線. 紫線は各クラスタにおける最初の地震の発生時刻. (d) 西・(e) 北・(f) 北東クラスタにおける理論拡散モデルに対する二乗平均平方根 (RMS) の空間分布. 色は最小 RMS で正規化した RMS. 逆三角形は最小 RMS となる場合の震源マイグレーションの空間原点. 丸は各クラスタの最初の地震の震源. 黒線は断面図 (右) と水平面図 (左) の位置の対応を示す. 黒点は群発地震活動. 本図は Amezawa *et al.* (2023) の Figure 2 を転載したものである.



第5図 南クラスタにおける間欠的な地震活動の震源マイグレーション. (a-h) 第3図 (a) で見られる間欠的な地震活動それぞれの震源マイグレーション. 丸の色はマグニチュード. 各活動の最初の地震の発生時刻は図の上部に示されている. (d) と (g) の橙色の影は, 橙色の枠内に拡大表示した時間窓. 灰色の実線は3つの異なる拡散係数に対する理論拡散曲線を示す. 本図は Amezawa *et al.* (2023) の Figure 3 を一部改変したものである.



第6図 南クラスタの深部を流体供給源と仮定した場合の群発地震活動の時空間発展の概念図(左図)と間隙流体圧の上昇によるギャップ域における水平クラックの開口の概念図(右図)。本図は Amezawa *et al.* (2023) の Figure 4 を一部改変したものである。

さまざまな地球物理学的・地球化学的調査が行われ、群発地震に関与した流体の起源が明らかになってきました。まず、地震波が媒質中を伝播する速さを推定する地震波走時トモグラフィ解析により、能登半島の北西部から北東部(群発地震域)にかけての下部地殻に、周囲よりも地震波速度が低速度な領域が推定されました(Nakajima, 2022)。一般に、流体やマグマが存在する領域で地震波速度は低くなることから、この領域には流体が豊富に存在していると考えられます。また、地下の電気伝導度を推定する比抵抗構造調査により、群発地震域の直下に低比抵抗(電気を通しやすい)領域が推定され、群発地震域の直下(深さ15 km以深)に流体が豊富に存在することが明らかになりました(例えば、吉村ほか, 2024)。さらに、南クラスタ周辺の温泉井から採取されたガスに含まれる $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比は大気中の値の約3.9倍と非常に高いことがわかりました(Umeda *et al.*, 2024)。地殻よりさらに深部のマントルには、惑星形成時に取り込まれた $^3\text{He}$ が保持されており、岩石中のウランやトリウムの放射性崩壊によって生成される $^4\text{He}$ に対し、 $^3\text{He}$ は放射性崩壊によって生成されません。そのため、 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比が高い流体はマントル付近が起源であると考えられています(例えば、Kennedy *et al.*, 1997)。このことから、能登半島北東部の群発地震に関与したと考えられている流体には、マントル付近を発生源とする流体が含まれる

可能性が指摘されています(Umeda *et al.*, 2024)。

ここで、南クラスタ深部側における円錐面状の震源分布を改めて考えてみましょう(第2図、動画1)。このような震源分布は、しばしばカルデラ火山直下で観測され、マグマ溜まりの天井部の崩壊に伴って形成される断層帯と考えられています(例えば、Acocella, 2007)。現在の能登半島では火山活動はないものの約1,500-2,000万年前の日本海拡大時にこの地域で活発な火山活動があったと考えられています(例えば、尾崎, 2010)。また、地下構造の密度不均質を反映するブーゲー異常のマッピング結果から、南クラスタ周辺に局所的な低重力異常が確認されました(例えば、Yoshida *et al.*, 2023)。一般に、カルデラ火山では陥没構造に低密度の火山性堆積物が堆積するため低重力異常となることが知られています。以上の観測事実と先述した地震波速度の低速度域・低比抵抗構造の推定結果から、南クラスタのさらに深部に過去の火山活動による古く固化しつつあるマグマ溜まり(あるいは現在進行中の未知の火山活動によるマグマ溜まり)が存在し、ここから分離上昇した流体が一連の群発地震活動を駆動した可能性が指摘されています(Yoshida *et al.*, 2023)。また、第4章で述べたように、南クラスタ深部側の間欠的な群発地震活動について観測された拡散的な震源マイグレーションの拡散係数が非常に大きいことを踏まえると、火山活動によって形成され

た断層帯は周囲より浸透率が高く、そこを流体が地震を発生させつつ選択的に移動したため、円錐面状の震源分布となったと考えられます。

## 6. 群発地震の長期継続要因

この群発地震が長期化した要因として「間欠的な流体供給」と「低浸透率環境」が挙げられます。南クラスタの深部側では、2020年末以降から2022年6月までに複数回の間欠的な群発地震活動が発生しており、これは流体が一挙に供給されず、数年かけて間欠泉のように供給されたことを意味しています。さらに、西・北・北東クラスタでのやや低めの震源マイグレーションの拡散係数は、これらの領域が低浸透率環境であることを意味しており、南クラスタから供給された流体がギャップ域を通して一旦これらの領域に達するとゆっくりと浸透しつつ群発地震活動を駆動したと考えられます(第6図)。このように、「間欠的な流体供給」と「低浸透率環境」という条件によって、群発地震域全体として群発地震を駆動するために十分な間隙流体圧が長期間維持されたことが、数年以上継続した群発地震の長期継続要因であると考えられます。

## 7. おわりに

本稿では、能登半島北東部で数年以上も長期継続した群発地震を対象に、その駆動メカニズムと長期継続要因についてご紹介しました。震源分布の詳細な解析から、群発地震活動が地殻内に存在するさまざまな構造(火山活動に起因するような構造・水平クラック的な構造・浸透率の不均質性など)に制御されている可能性が見えてきました。また、長期継続要因の1つとして、間欠的な流体供給という重要な観測が得られました。今後、他の地域の群発地震に対する比較研究が進むことで、能登半島北東部の群発地震のユニークさや共通点が明らかになっていくでしょう。一方、この群発地震に関して、依然として多くの謎が残されています。例えば、「南クラスタ浅部側の群発地震と深部側の群発地震を駆動した流体供給源は同一なのか?」「なぜ、各クラスタの地震活動の特徴が異なるのか?」「なぜ、このタイミングで群発地震が発生したのか?」「なぜ、4つのクラスタでしか地震活動がないのか?」と謎が尽きません。今後、これらの謎を解明していくことで、群発地震ひいては地震活動一般についての理解がさらに深まっていくでしょう。

**謝辞:** 本稿でご紹介した Amezawa *et al.* (2023) では、気

象庁一元化震源、気象庁による検測値、気象庁・防災科学技術研究所 Hi-net・国立大学法人の観測点で観測された観測波形記録、および防災科学技術研究所 F-net による CMT 解を使用しました。記して感謝いたします。

## 文献

- Acocella, V. (2007) Understanding caldera structure and development: An overview of analogue models compared to natural calderas. *Earth-Science Reviews*, **85**, 125–160.
- Amagai, T., Okamoto, A., Niibe, T., Hirano, N., Motomiya, K. and Tsuchiya, N. (2019) Silica nanoparticles produced by explosive flash vaporization during earthquakes. *Scientific Reports*, **9**, 9738.
- Amezawa, Y., Maeda, T. and Kosuga, M. (2021) Migration diffusivity as a controlling factor in the duration of earthquake swarms. *Earth Planets and Space*, **73**, 148.
- Amezawa, Y., Hiramatsu, Y., Miyakawa, A., Imanishi, K. and Otsubo, M. (2023) Long-living earthquake swarm and intermittent seismicity in the northeastern tip of the Noto Peninsula, Japan. *Geophysical Research Letters*, **50**, e2022GL102670.
- Cappa, F., Rutqvist, J. and Yamamoto, K. (2009) Modeling crustal deformation and rupture processes related to upwelling of deep CO<sub>2</sub>-rich fluids during the 1965–1967 Matsushiro earthquake swarm in Japan. *Journal of Geophysical Research*, **114**, B10304.
- Chen, X., Shearer, P. M. and Abercrombie, R. E. (2012) Spatial migration of earthquakes within seismic clusters in Southern California: Evidence for fluid diffusion. *Journal of Geophysical Research*, **117**, B04301.
- Danré, P., De Barros, L., Cappa, F. and Ampuero, J. P. (2022) Prevalence of aseismic slip linking fluid injection to natural and anthropogenic seismic swarms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **127**, e2022JB025571.
- Dublanchet, P. and De Barros, L. (2020) Dual seismic migration velocities in seismic swarms. *Geophysical Research Letters*, **48**, e2020GL090025.
- Goebel, T. H. and Brodsky, E. E. (2018) The spatial footprint of injection wells in a global compilation of

- induced earthquake sequences. *Science*, **361**, 899–904.
- Kato, A. (2024) Implications of fault-valve behavior from immediate aftershocks following the 2023 Mj6.5 earthquake beneath the Noto Peninsula, central Japan. *Geophysical Research Letters*, **51**, e2023GL106444.
- Kennedy, B. M., Kharaka, Y. H., Evans, W. C., Ellwood, A., DePaolo, D. J., Thordsen, J., Ambats, G. and Mariner, R. H. (1997) Mantle fluids in the San Andreas fault system, California. *Science*, **278**, 1278–1281.
- Nakajima, J. (2022) Crustal structure beneath earthquake swarm in the Noto peninsula, Japan. *Earth Planets and Space*, **74**, 160.
- Nishimura, T., Hiramatsu, Y. and Ohta, Y. (2023) Episodic transient deformation revealed by the analysis of multiple GNSS networks in the Noto Peninsula, central Japan. *Scientific Reports*, **13**, 8381.
- 尾崎正紀 (2010) 能登半島北部の 20 万分の 1 地質図及び説明書. 数値地質図 S-1, 海陸シームレス地質情報集「能登半島北部沿岸域」, 産総研地質調査総合センター.
- Shapiro, S. A. and Dinske, C. (2009) Fluid - induced seismicity: Pressure diffusion and hydraulic fracturing. *Geophysical Prospecting*, **57**, 301–310.
- Shapiro, S. A., Huenges, E. and Borm, G. (1997) Estimating the crust permeability from fluid-injection-induced seismic emission at the KTB site. *Geophysical Journal International*, **131**, F15–F18.
- Shelly, D. R., Ellsworth, W. L. and Hill, D. P. (2016) Fluid-faulting evolution in high definition: Connecting fault structure and frequency-magnitude variations during the 2014 Long Valley Caldera, California, earthquake swarm. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**, 1776–1795.
- Talwani, P., Chen, L. and Gahalaut, K. (2007) Seismogenic permeability, ks. *Journal of Geophysical Research*, **112**, B07309.
- Toda, S., Stein, R. S. and Sagiya, T. (2002) Evidence from the AD 2000 Izu islands earthquake swarm that stressing rate governs seismicity. *Nature*, **419**, 58–61.
- Ujii, K., Saishu, H., Fagereng, Å., Nishiyama, N., Otsubo, M., Masuyama, H. and Kagi, H. (2018) An explanation of episodic tremor and slow slip constrained by crack-seal veins and viscous shear in subduction mélange. *Geophysical Research Letters*, **45**, 5371–5379.
- Umeda, K., Yamazaki, Y. and Sumino, H. (2024) Geochemical signature of deep fluids triggering earthquake swarm in the Noto Peninsula, central Japan. *Geophysical Research Letters*, **51**, e2024GL108581.
- Yoshida, K., Uno, M., Matsuzawa, T., Yukutake, Y., Mukuhira, Y., Sato, H. and 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. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **128**, e2022JB026047.
- 吉村令慧・平松良浩・後藤忠徳・笠谷貴史・宮町凜太郎・中川 潤・山下 凪・天野 玲・深田雅人・杉井天音・乾 太生・山崎健一・小松信太郎・岩堀卓弥・吉川昌弘・波岸彩子・長岡愛理・達山康人・澤田明宏・張 策・福岡光輝・陣出湧也・大島由有希・金沢桃夏 (2024) 2024 年能登半島地震震源域周辺の 3 次元比抵抗構造. 日本地球惑星連合 2024 年大会, U15–P56.
- Yukutake, Y., Ito, H., Honda, R., Harada, M., Tanada, T. and Yoshida, A. (2011) Fluid-induced swarm earthquake sequence revealed by precisely determined hypocenters and focal mechanisms in the 2009 activity at Hakone volcano, Japan. *Journal of Geophysical Research*, **116**, B04308.

---

AMEZAWA Yuta (2024) Long-lived earthquake swarm preceded the 2024 Noto Peninsula earthquake.

---

(受付：2024 年 8 月 29 日)