

2024 年能登半島地震の地震波放射の様子を可視化

～複雑な断層分布と地震波の周波数との関連性を示唆～

ポイント

- ・世界中の地震観測データを用い、2024 年能登半島地震の地震波が放射される過程を可視化。
- ・能登半島内陸側と北東沖の海域側の断層破壊で、地震波の周波数成分が異なることを確認。
- ・地震波の周波数変化が、地下の複数の断層面のつながりや形状の変化と関係する可能性を示唆。

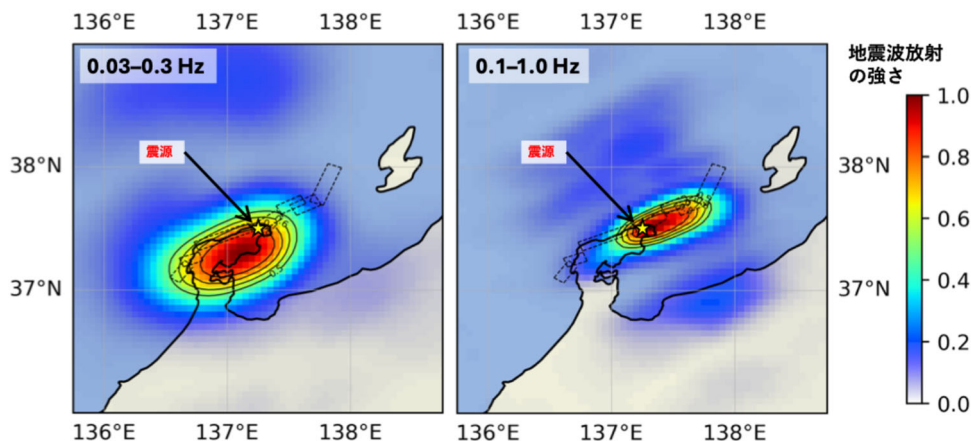
概要

北海道大学大学院理学研究院の吉澤和範教授と垂水洸太郎 日本学術振興会特別研究員の研究グループは、世界各地に展開されたグローバル地震観測網（Global Seismographic Network; GSN）で記録された地震波データをもとに、2024 年 1 月 1 日（日本時間 16:10 頃）に発生した能登半島地震における断層破壊に伴う地震波の放射過程を調べました。解析には、「バックプロジェクション法」*1と呼ばれる手法を用い、複数の周波数帯域において、地震波（P 波）が放射された場所を時間毎に可視化しました。

その結果、能登半島北東端付近の震源での地震発生から、約 44 秒間で 4 段階のプロセスを経て、能登半島内陸側と北東の海域側の 2 方向に破壊が広がり、それぞれの領域から放たれた地震波の周波数が異なることが明らかになりました。能登半島の内陸側の破壊からは主に低周波帯の P 波が放射された一方、北東沖の破壊では、高周波成分を含み、特に、断層面の分岐点や傾斜方向が変化する場所付近では、より高い周波数の P 波が放射される様子が見て取れます。これらは、複雑な断層形状を持つ複数の断層面にまたがる破壊進展の影響を反映しているものと考えられます。

このような地震波の周波数に見られる違いは、断層面形状の複雑さや、破壊の速さとその変化、地下の流体等とも関係し、過去の大地震（例：2011 年東北地方太平洋沖地震や 2016 年熊本地震）でも観測されています。今回の研究は、複雑な断層構造に関わる内陸地震への理解を一層深めることにつながると期待されます。

本研究成果は、2025 年 6 月 20 日（金）公開の Earth and Planetary Science Letters 誌にオンライン掲載されました。



能登半島地震による P 波の放射領域：（左）0.03-0.3Hz、（右）0.1-1.0Hz。破壊継続時間全体で累積した P 波の放射領域を示している。（5 秒間毎のスナップショットは図 2 を参照。）

【背景】

2024 年 1 月 1 日 16:10 頃、能登半島で発生したマグニチュード 7.5 の大地震（2024 年能登半島地震）が発生しました。この地震では、能登半島の陸域から北東沖の海域にかけて広い範囲で断層が破壊され、強い揺れや地殻変動、津波などにより甚大な被害がもたらされました。この地域では、2020 年ごろから群発地震が続いており、地下深くから上昇してきた流体が断層の破壊やすべりを促進し、地震活動が活発になっていると考えられています。また、能登半島北東沖には、これまでの地質調査によって、向きや傾きの異なる断層が複数存在していることも分かっていました（図 1）。このような複雑な震源断層で起こる地震では、断層破壊に伴って放出される地震波の周波数に特徴的な違い（周波数依存性）が観測されることがあります。しかし、能登半島地震では、その様子がまだ十分に明らかになっていませんでした。

【研究手法】

本研究では、世界各地に設置されたグローバル地震観測網（Global Seismographic Network; GSN）で記録された地震波のうち、P 波と呼ばれる最初の揺れを対象に解析を行いました。特に、異なる四つの周波数帯域毎に「バックプロジェクション法」を用いて、P 波がいつどこから放射されたのかを詳しく再現することで、P 波の放射過程を可視化しました。この結果から、周波数毎の地震波放射の違いと断層破壊との関連について精査しました（図 2）。

【研究成果】

解析の結果、能登半島地震は主に四つの段階（E1~E4）に分けられることが分かりました（図 2）。

- E1（開始直後～18 秒）：震源付近から主に高周波の P 波（およそ 0.5 Hz 以上）が放射される。
- E2（18～28 秒）：再び強い高周波の P 波が放射され、これが大規模破壊（E3、E4）の引き金に。
- E3（28～44 秒）：破壊が能登半島内陸側へ広がり、主に低周波の P 波が放射される（図 2(a)）。
- E4（28～44 秒）：北東の海域側へ破壊が進展し（図 2(b)）、やや低周波～高周波の P 波が放射される。

E3 の段階で放射される P 波は主に低周波で、周波数の顕著な変化は見られませんでした。一方で、E4 の段階では時間とともに放射される P 波の周波数が連続的に変化することが明らかになりました（図 2(b、c)）。

事前の断層調査によると、能登半島内陸域の直下では断層面はほぼ一様に分布する一方で、北東側の海域では断層面の分岐や傾きの変化が存在します。特に、E4 の顕著な周波数の違いが観測された場所は、断層面の分岐点や傾きが変わる地点と一致していました。つまり、破壊が複数の断層面にまたがって進んだことで、地震波の周波数特性が変化したと考えられます。

これらの結果から、能登半島地震における周波数依存する複雑な地震波の放射過程は、断層面の複雑な幾何形状と密接に関連していたものと考えられます。

【今後への期待】

今回の研究により、2024 年能登半島地震での地震波放射過程は明確な周波数依存性を示し、その原因として複雑な断層構造が関与していることが分かりました。こうした断層の分岐や傾斜の変化は、2016 年の熊本地震など、内陸活断層でも見られます。地震波の周波数依存性を詳しく調べることで、

破壊の広がり方や、地下でどの断層が動いたのかといった情報を把握する手がかりになります。また、地震波の周波数特性は、建物や構造物に地震動が与える影響にも直結するため、防災・減災の観点からも重要です。

この研究成果は、能登半島地震に限らず、複雑な断層構造をもつ内陸活断層型地震の理解をさらに深め、将来の地震災害の予測や被害軽減にも貢献するものと期待されます。

論文情報

論文名	Frequency-dependent seismic radiation process of the 2024 Noto Peninsula earthquake from teleseismic P-wave back-projection (遠地 P 波のバックプロジェクション解析による 2024 年能登半島地震の周波数依存した地震波放射過程)
著者名	垂水洸太郎 ^{1, 2} 、吉澤和範 ^{1, 2} (¹ 北海道大学大学院理学院、 ² 北海道大学大学院理学研究院)
雑誌名	Earth and Planetary Science Letters (地球惑星科学全般の専門速報誌)
D O I	10.1016/j.epsl.2025.119509
公表日	2025 年 6 月 20 日 (金) (オンライン公開)

お問い合わせ先

北海道大学大学院理学研究院 日本学術振興会特別研究員 (PD) 垂水洸太郎 (たるみこうたろう)
メール ktarumi@sci.hokudai.ac.jp

北海道大学大学院理学研究院 教授 吉澤和範 (よしざわかずのり)

T E L 011-706-3620 メール yoshizawa@sci.hokudai.ac.jp

U R L <https://geodynamics.sci.hokudai.ac.jp/seis/>

配信元

北海道大学社会共創部広報課 (〒060-0808 札幌市北区北 8 条西 5 丁目)

T E L 011-706-2610 F A X 011-706-2092 メール jp-press@general.hokudai.ac.jp

【参考図】

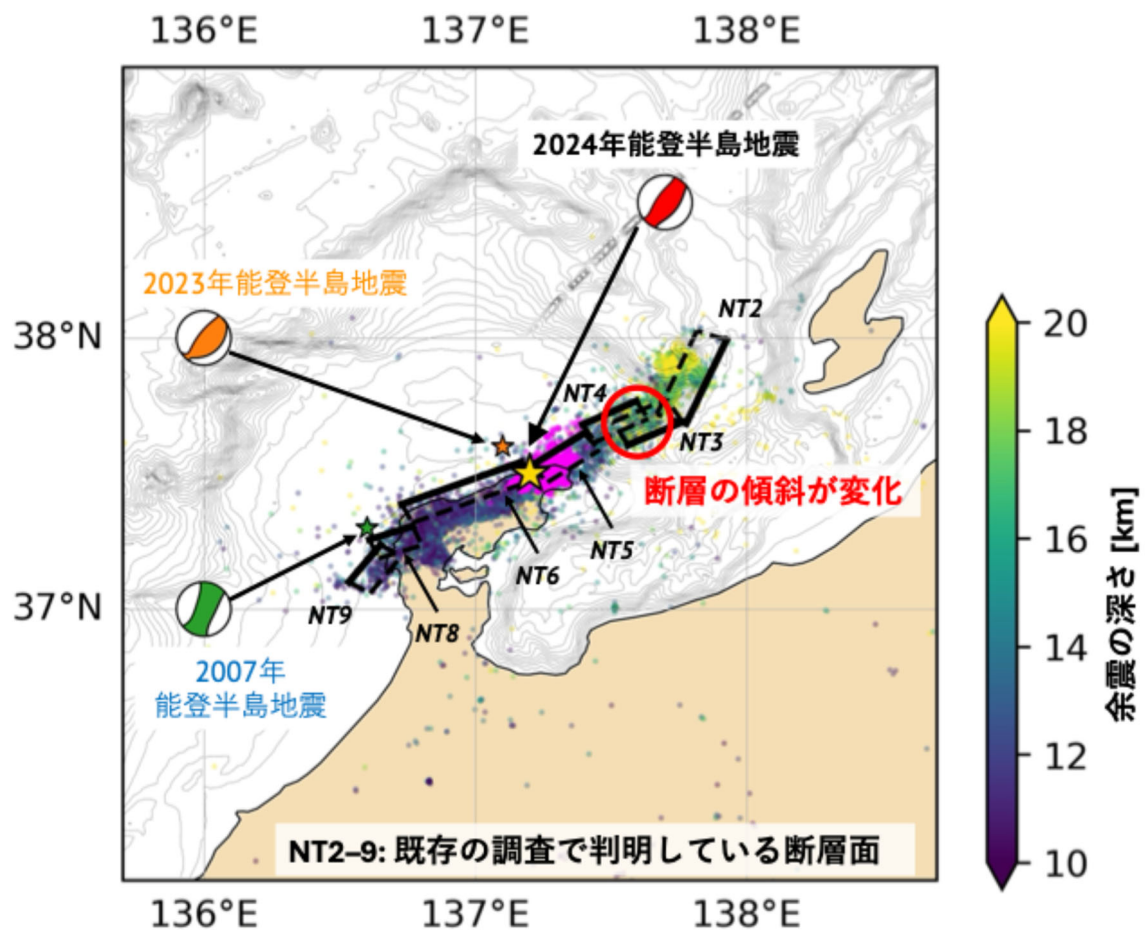


図 1. 能登半島周辺の断層面と地震活動の分布（論文の Fig. 1 を改変）。黒の長方形（NT2-9）は、既存の調査で判明している断層面分布を示し、それぞれの黒実線は断層面の上端を示す。特に NT3（北傾斜）と NT4（南傾斜）では、断層面の傾斜方向が変化している（図の赤丸）。ピンクの点は 2021 年以降に発生した群発地震を示し、能登半島北東部に集中している。カラースケールに応じて色付けされた点は 2024 年能登半島地震（黄色の星）発生後の余震の分布を示す。

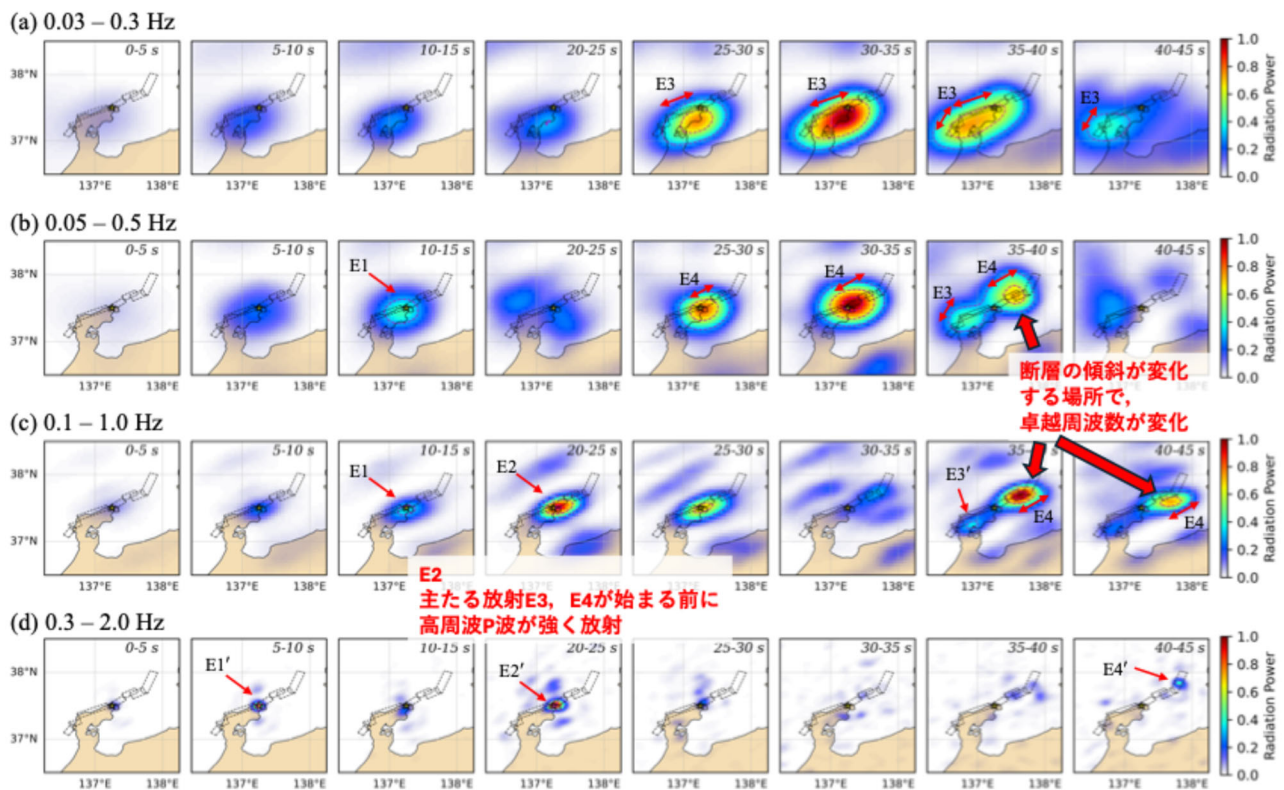


図 2. 四つの周波数帯域における P 波のバックプロジェクション解析結果 (5 秒ごとのスナップショット、a: 0.03–0.3 Hz; b: 0.05–0.5 Hz; c: 0.1–1.0 Hz; d 0.3–2.0 Hz、論文の Fig. 3 を改変)。各図は、P 波が強く放射された場所を 5 秒間隔で示し、赤い部分ほど放射の強い領域を表す。E1～E4 は、本研究で同定された断層破壊過程における四つの段階を示す。特に E2 では、主な破壊進展 (E3・E4) が始まる前に、高周波の P 波が局所的に強く放射されていることが分かる。また、E4 では破壊が進行する中で、断層の傾斜が変化する地点 (図 1 参照) を境に、卓越する周波数帯が明瞭に変化する様子が見られる。

【用語解説】

*1 バックプロジェクション法 … 多数の地震観測点で記録された地震波のデータをもとに、励起源へ逆投影することによって、地震波が放射された時刻と場所、その強さを可視化する解析手法。