

11 - 7 令和 6 年能登半島地震の強震動と強震記録に基づく震源過程 Strong ground motions and fault rupture process of the 2024 Noto-Hanto earthquake of M7.6

岩田知孝（京都大学名誉教授）・浅野公之（京都大学防災研究所）
Tomotaka Iwata (Prof. Emeritus, Kyoto Univ.) and Kimiyuki Asano (DPRI, Kyoto Univ.)

令和 6 年（2024 年）1 月 1 日の能登半島地震（MW7.6）では、能登半島北部の奥能登地域を主として強い揺れに見舞われ、多くの建物被害や地盤被害等が生じた。日本全国に展開された強震観測網において、震源域の珠洲市、輪島市、穴水町の建物被害の大きい小規模平野での記録が得られている。これらの記録の特徴を紹介するとともに、甚大な建物被害等を与えた強震動の成因について、震源特性（断層破壊過程）およびサイト特性（観測点近傍の地震動増幅）の観点から議論する。

震源域の地震動記録の前に、この地震の地震動特性を確認する。観測された最大地動加速度や最大地動速度を断層最短距離でプロットし、既往の地震記録によって回帰された地震動予測式と比較すると、観測値は地震動予測式の標準偏差内にほとんど収まっており、これらの地震動強さは過去と同規模の地震と同程度であり、特異ではなかった¹⁾。

次に奥能登地域で観測され、周辺の建物被害が甚大であった珠洲市（ISK002, K-NET 正院）、輪島市（JMAE10, 輪島特別地域気象研究所）、穴水町（ISK005, K-NET 穴水）の記録を見る。ISK002 と JMAE10 では震度 6 強、ISK005 は震度相当値として震度 7 の揺れであった。第 1 図には、上記 3 地点のオリジナル加速度波形を周期 10 秒のハイパスフィルターを通して速度波形にしたものと、2016 年熊本地震本震での西原村（震度 7）、1995 年兵庫県南部地震の神戸・JR 鷹取の速度波形（震度 7 相当）も同じスケールで比較として載せている。最大地動速度は過去の地震記録が勝っているが、それらの記録の強い震動の継続時間は 10 秒程度であるのに対して、奥能登の観測記録は 1 m/s を超えるレベルの地震動が 20～30 秒も続いていることが見て取れる。能登半島地震の記録が長時間強く揺れているのは、奥能登地域が長大な震源断層の上盤側に位置しており、強い揺れに見舞われる位置であったことに加えて、複雑な断層破壊過程により長い震源継続時間となったことで、震源から長時間揺れが伝わってきていたことによると考えられる。

強震記録を用いた震源過程推定がいくつかの研究グループ^{例えば 2)-5)}で実施されているが、ここでは Asano and Iwata (2024)⁵⁾の震源断層モデル設定と結果について概略を示す。震源断層モデルの幾何学的設定は、本震後の地震活動分布や能登半島沖の活断層位置等を参考に設定した。気象庁の震源カタログでは、1 月 1 日 16 時 10 分 9.5 秒に M5.9 の地震が発生し、16 時 10 分 22.5 秒に M7.6 の地震（本震）が発生したとされている。本震後の珠洲市直下の地震活動分布には、2 枚のほぼ平行に位置する、南下がりの地震活動が見られ^{例えば 6)}、M5.9 の地震はその地震活動の深い方に載っていた。Asano and Iwata(2024)では⁵⁾16 時 10 分 9.5 秒から一連の断層運動が継続していると仮定し、10 分 9.5 秒の M5.9 の震源を破壊開始点として、南西方向に破壊伝播する断層面と 10 分 22.5 秒の破壊が珠洲市直下の 2 重地震活動分布の浅い面に対応する震源断層面から北東側に破壊伝播するような断層面モデルの設定を行い、強震波形インバージョンにより震源断層の破壊伝播、すべり分布を求めた。第 2 図に仮定した震源断層面と 5 秒ごとのすべり分布を示す。結果的に時間遅れした破壊が起きたことで、珠洲市を中心とした奥能登地域では、長時間の揺れに見舞われることとなった。

破壊的強震動の周期特性の話に戻る。第 1 図でとりあげた能登半島地震の観測点は、それぞれの

市街地に置かれている。珠洲市、輪島市、穴水町の中心部は広がり数km程度の小規模平野にある。このうち珠洲市では 2020 年末からの群発地震活動により、有感地震が発生していた。この中で 2022 年 6 月 19 日に M5.4 の地震が発生し、ISK002 では震度 6 弱を計測し、市街地においては住居の一部損壊や神社の鳥居倒潰といった地震動被害が起きた。ISK002 で見られる周期 1 秒程度の地盤震動増幅特性に着目し、このサイト付近でアレイ微動観測を行った。これから、S 波速度の遅い（推定値は $V_s=160\text{m/s}$ ）表層が数十m存在して、その下には V_s が大きい（ $V_s=660\text{m/s}$ と推定）層があること、この表層地盤構造が周期 1 秒の地震動増幅を引き起こしていることをつきとめた。珠洲市街地のボーリング情報や表層地質情報を踏まえると、 V_s の大きな層は珪藻泥岩層で、その上に軟弱な沖積層の堆積により構成されている。速度コントラストが大きいことが、周期 1 秒の地震動増幅をより強めていると考えられる⁷⁾。

珠洲市は 1993 年能登半島沖の地震（M 6.6）でも建物被害が生じた。地盤の卓越周期を単点 HV スペクトル比のピークで推定する方法が適用され、市街地でも場所により卓越周期が異なることや、周期 1 秒程度の卓越周期の地点で被害が見られることが指摘されていた⁸⁾。

このような状況は穴水町の ISK005 でも見られた。このサイトは 2007 年能登半島地震（M6.9）で震度 6 強を観測した。穴水町の市街地が広がる小平野内で観測点間約 100 m 程度の高密度微動単点観測を行い、ピーク周期を求めると、ISK005 では周期 1 秒程度である一方、平野内の卓越周期は空間的に複雑に変化していることがわかった⁹⁾。

珠洲市では、ISK002 から東に数km離れた珠洲市街地の小平野の外の、地盤がよいところに、気象庁震度計（三崎町 JMACCA）観測点がある。第 3 図には、ISK002 と JMACCA の観測点位置と速度波形の比較を示す。観測点地図は、J-SHIS の表層地盤増幅率マップを重ね書きしている。ISK002 の記録は第 1 図でも示したが周期 2 秒程度の強震動が長時間続いているが、平野外の JMACCA にはそのような卓越周期の波は明瞭には見られない。このことから、ISK002 で卓越した周期 2 秒程度の強震動は、観測点近傍の表層地盤により生成されていると推定される。

アレイ微動による ISK002 の表層地盤モデルでは周期約 1 秒の増幅が推定され、それは 2022 年 6 月 19 日 M5.4 の地震や 2023 年 5 月 5 日 M6.5 の地震での周期約 1 秒の卓越周期が観察された。それでは 2024 年 1 月 1 日の M7.6 の地震の時の観測地震動の卓越周期はなぜ 2 秒になっていたのだろうか？それには表層地盤の強震による非線形応答が関与している。S 波の増幅を考えると、柔らかい地盤に大きな地震動が入力すると、応力-ひずみ関係が線形ではなくなり、みかけの剛性率が低下し、結果として、地盤の卓越周期が長周期化する。これを地盤の非線形応答という。なお、ある程度水を含んだ砂地盤を考えた場合、地盤構成を壊してしまうようなより強い地震動が加わると、地盤の液状化といった現象につながる。地盤の非線形応答の度合いを評価するため、地震動の S 波部分の HV 振幅スペクトル比の変化を数値化した、DNL 指標（degree of nonlinearity）がある¹⁰⁾。地震学では HV スペクトル比を取ることで、震源項を相殺し、観測点近傍の影響をみることができ、レシーバ関数が地殻構造モデリングに使われているが、それと同じ理由で、HV 振幅スペクトル比により観測点近傍の影響を見ることができ、それが弱震と強震で違う程度を見出す指標である。

第 4 図に ISK002 における一連の M5.4, M6.5, M7.6 のイベントとそれぞれその地震の前に起きた小地震記録の S 波部分の HV スペクトル比を比較している。小地震記録は地盤非線形を起こしていないような最大加速度 20 cm/s² 以下の弱震記録のものであるを。M5.4 の地震の HV スペクトル比はその前の弱震の平均値とほぼ変わらないが、M6.5 の地震のそれは弱震より高周波数側ですこし

違っている。M7.6 の地震のそれは、弱震とは大きく違っていることがわかる。図面には、M7.6 イベントの後の弱震 HV スペクトル比も図示した。4 期間の青線（弱震の平均値）は相互によく似ており、このサイトでは強震時には地盤の非線形応答が起きたが、地盤の液状化といった地盤特性が変わってしまうような変化はほとんどなかったと推定される。

第 5 図には、奥能登地域の M7.6 の地震時の揺れの DNL 指標を地図に示した。小規模平野内における観測点で DNL 指標が大きく、M7.6 の地震の時に強い地盤の非線形応答があったと考えられ、このために強い揺れではない時には周期約 1 秒で揺れる特性が、強震により長周期化したことで一般構造物等に厳しい揺れになったと考えることができる。適切な地盤構造モデルの構築と地盤の非線形応答評価を行うことで、定量的な評価につながると考える。なお、2024 年能登半島地震の強震記録にみられる地盤の非線形特性についての詳しい分析も行われている¹¹⁾。

2024 年能登半島地震の観測された強震動記録から、特に奥能登地域における一般構造物の被害に関係する地震動特性について、震源および表層地盤の影響の観点からまとめた。大都市圏は大規模な平野に広がっている一方、地方では小規模平野や盆地に人が住んでおり、浅部地盤構造を含む地盤モデルの高度化を進めることが地震防災には必要不可欠であるとともに、高密度な調査観測が必要であることが課題と言える。

(岩田 知孝・浅野 公之)

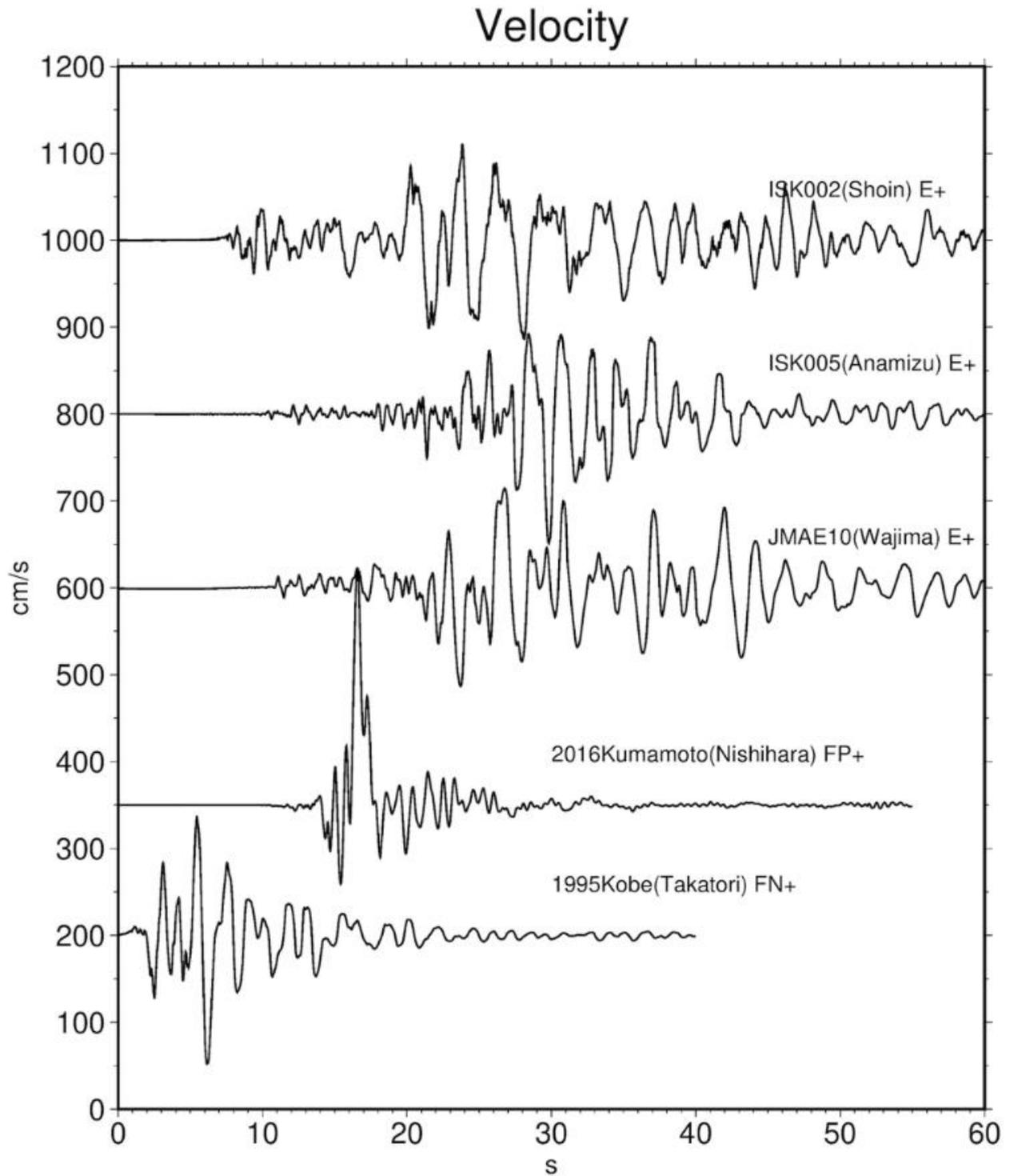
IWATA Tomotaka and ASANO Kimiyuki

謝辞

防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net(<https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>), 気象庁震度計, 石川県および熊本県自治体震度情報ネットワーク, JR 鷹取の波形データを利用しました。記して感謝致します。

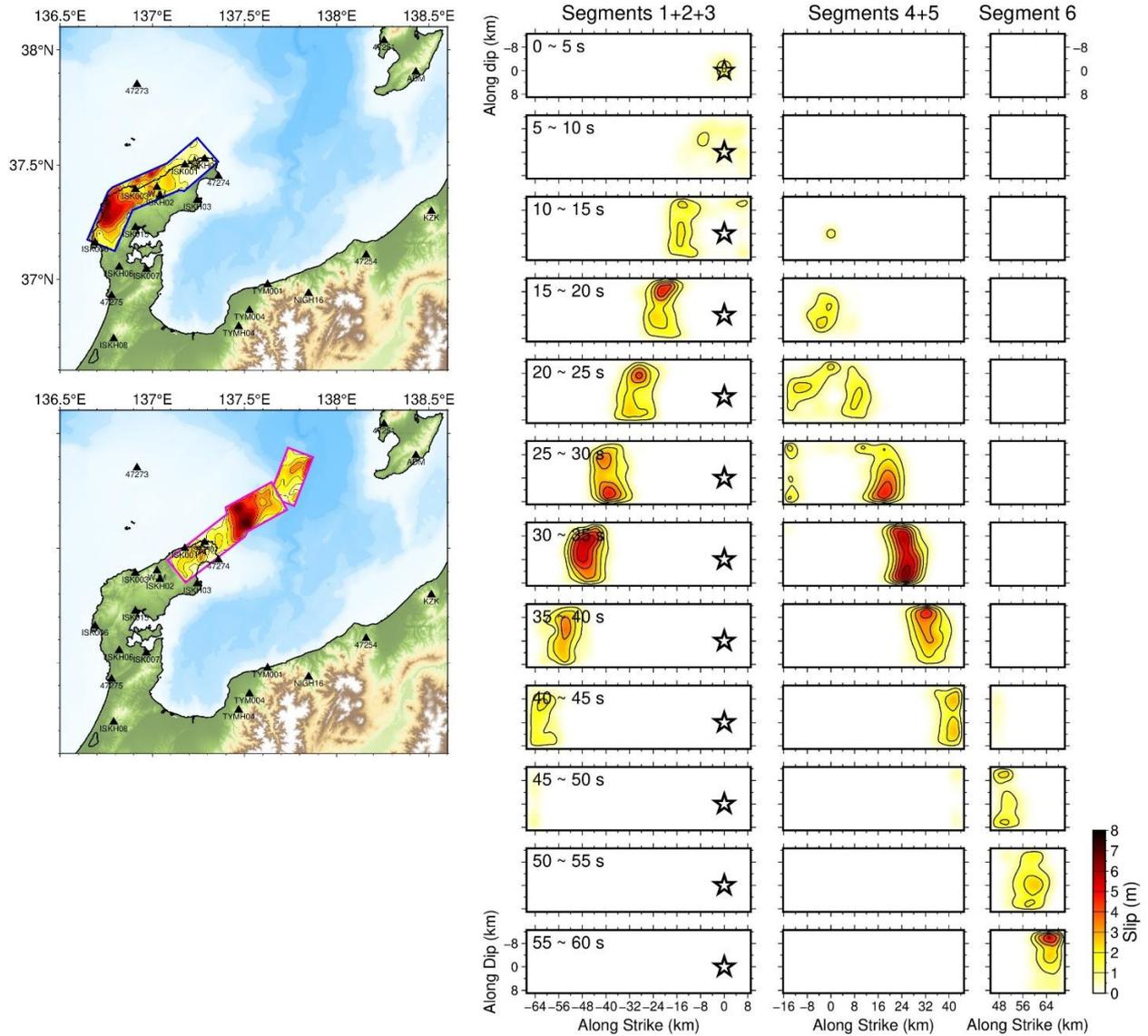
参考文献

- 1) 後藤浩之・ほか (2025), 地盤工学会災害調査論文報告集, **3-1**, 2-19.
- 2) Guo et al.(2024) *Earth Planets Space*, **76**:177.
- 3) Enomoto et al.(2025) *Earth Planets Space*, **77**:83.
- 4) Kobayashi et al. (2025) *Earth Planets Space*, **77**:104.
- 5) Asano and Iwata (2024) AGU 2024 Fall Meeting, N51B-05.
- 6) Yoshida et al. (2024) *Geophys. Res. Lett.*, e2024GL110993. <https://doi.org/10.1029/2024GL110993>.
- 7) 岩田知孝・ほか (2022) 日本地震学会 2022 年秋季大会, S16-04.
- 8) (社) 土質工学会・1993 年地震災害調査委員会 (1994) 1993 年釧路沖・能登半島沖地震 災害調査報告書, 404pp.
- 9) 浅野公之・ほか (2009) *地震第 2 輯*, **62**, 121-135.
- 10) 野口科子・笹谷努 (2011) *地震第 2 輯*, **63**, 165-187.
- 11) Hallo et al. (2025) *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 130, e2024JB029961. doi: 10.1029/2024JB029961
- 12) J-SHIS 地震ハザードステーション <https://www.j-shis.bosai.go.jp/>



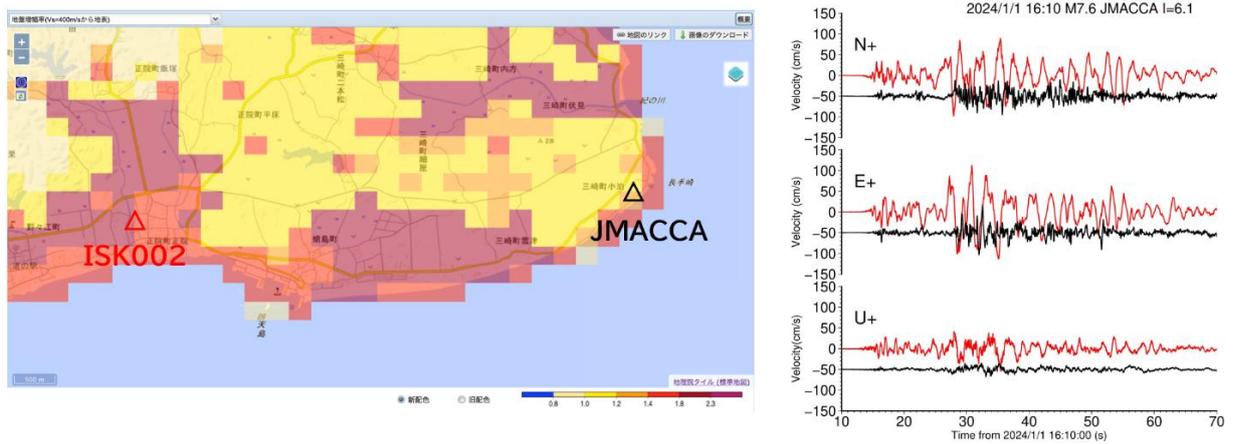
第 1 図 2024 年能登半島地震の珠洲市正院町正院 (K-NET ISK002), 穴水町大町ほ (K-NET ISK005), 輪島市鳳至町島田 (JMAE10) の速度波形 (東西成分) と 2016 年熊本地震 (M7.3) の西原村小森の震源断層平行成分, 1995 年兵庫県南部地震の JR 鷹取の震源断層直交成分の比較.

Fig. 1 Comparisons of observed velocity waveforms. From top to bottom, the EW-components of K-NET ISK002 (Suzu city), K-NET ISK005 (Anamizu town), and JMAE10 (Wajima city) for the 2024 Noto Hanto earthquake (M7.6), the fault parallel component of Nishihara during the 2016 Kumamoto (M7.3) earthquake, and the fault normal component of JR Takatori during the 1995 Kobe earthquake.



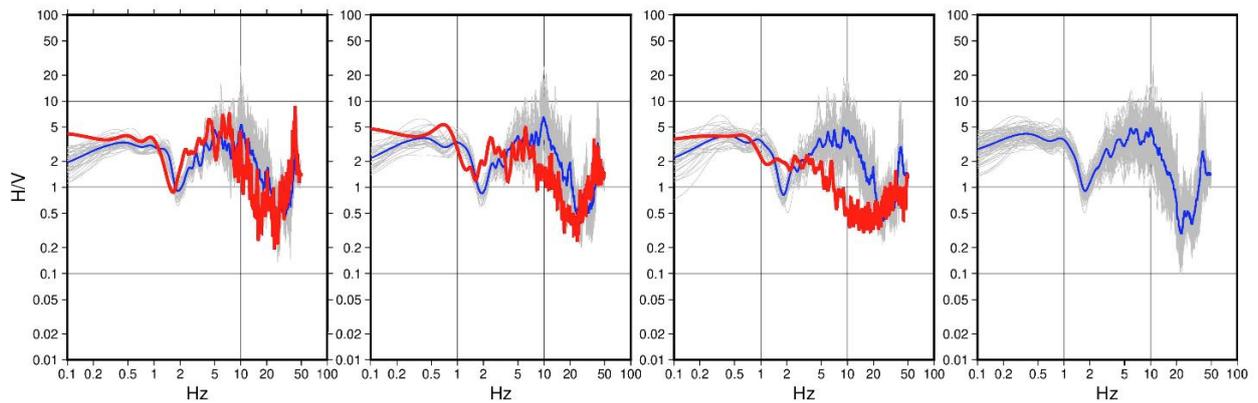
第 2 図 強震記録を用いた断層破壊モデル 6)。(左上)セグメント 1～3, (左下)セグメント 4～6 の最終すべり分布。(右)破壊開始から 5 秒ごとのすべりのスナップショット。

Fig. 2 Fault rupture model of the 2024 Noto Hanto earthquake (M7.6) 6). Final slip distribution of the segments 1-3 (left upper) and the segments 4-6 (left lower). (Right) Snap shots of the source slip.



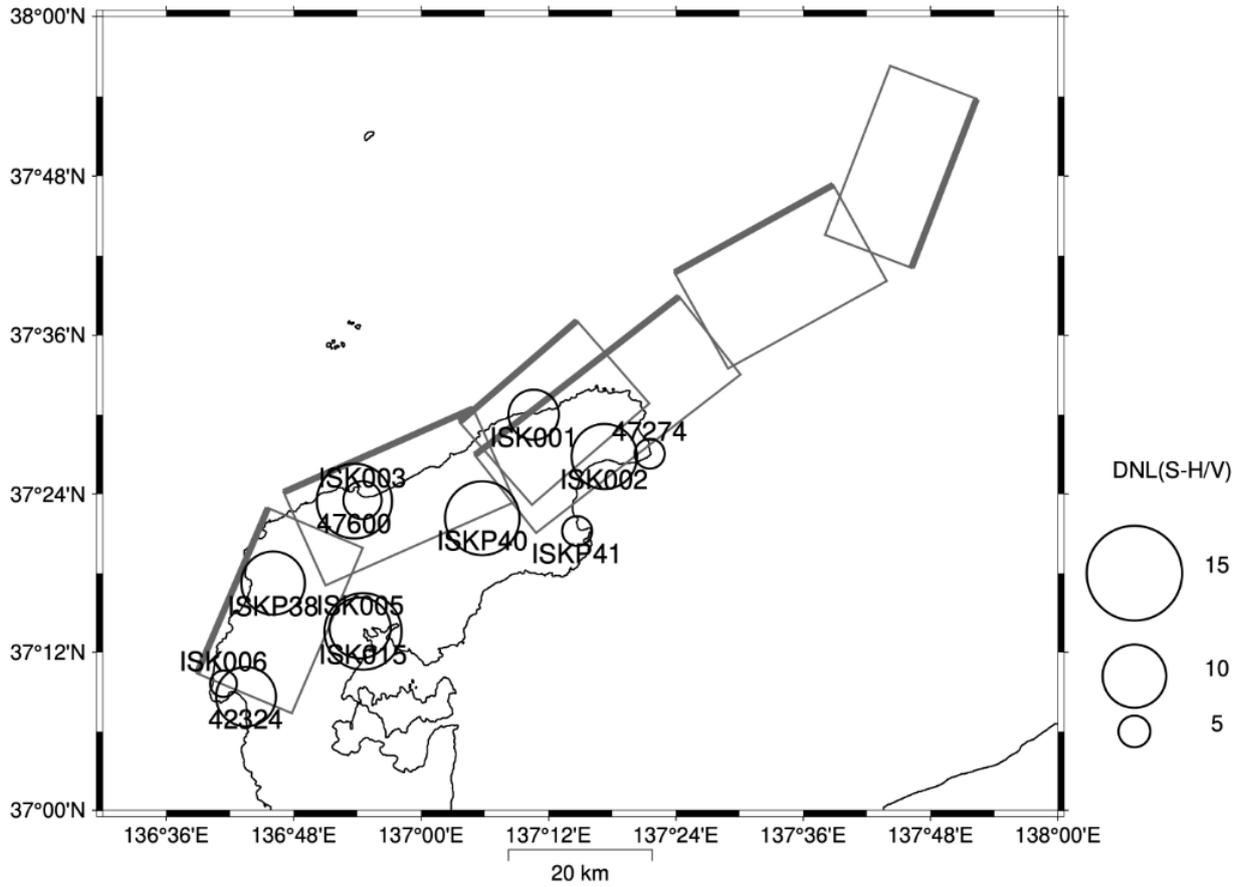
第 3 図 左) 珠洲市南部の強震観測点位置. 珠洲市正院 (K-NET ISK002) と珠洲市三崎町 (JMACCA). カラーは J-SHIS の表層地盤増幅率¹²⁾. (右) 両地点の速度波形の比較.

Fig. 3 (Left) Map of strong motion stations in Suzu city. K-NET ISK002 and JMACCA. Colors indicate amplification factor from the engineering bedrock by J-SHIS¹²⁾. (Right) comparisons of three component velocity waveforms of ISK002 and JMACCA.



第 4 図 K-NET ISK002 における記録の S 波部分 HV 振幅スペクトル比の比較. 赤線は M5.4, M6.5, M7.6 の地震記録で, 薄線が弱震 (最大加速度 20cm/s/s 以下) イベントで, 青線はその平均値. 左から, 2020 年より 2022 年 6 月 19 日 M5.4 の地震前までの弱震と M5.4 の地震, M5.4 の地震以降 2023 年 5 月 5 日 M6.5 の地震前までの弱震と M6.5 の地震, M6.5 の地震以降 2024 年 1 月 1 日 M7.6 の地震前までの弱震と M7.6 の地震, M7.6 の地震以降の弱震, を示している.

Fig. 4 Comparison of S-wave component HV amplitude spectrum ratios in K-NET ISK002 records. The red lines correspond to those of the M5.4, M6.5, M7.6 earthquake records, respectively. The thin lines indicate weak-motion (maximum acceleration ≤ 20 cm/s/s) events, and the blue lines show their average. From left to right: weak-motion events from 2020 until before the M5.4 earthquake on June 19, 2022, and the M5.4 earthquake itself; weak events and the M6.5 earthquake from after the M5.4 earthquake until before the May 5, 2023 M6.5 earthquake; weak events and the M7.6 earthquake from after the M6.5 earthquake until before the January 1, 2024 M7.6 earthquake; weak events after the M7.6 earthquake, respectively.



第 5 図 奥能登地域における強震観測点で得られた 2024 年能登半島地震本震の DNL 値分布.

Fig. 5 DNL values for the strong motion stations in Oku-Noto area for the 2024 Noto Hanto earthquake.