

第4章 地震、地震動及び津波

4.1 地震と津波の概要と特徴

令和6年（2024年）能登半島地震は、能登半島北側の海底に存在する活断層がもたらした内陸地震であり、発震機構は北西—南東方向に圧力軸を持つ逆断層型である。震源の破壊過程については複数の機関により提案されているが、強震波形記録に基づく解析結果の多くは、震央の北東側（海域）および南西側（能登半島北西部）の双方に大きなすべり域を持つモデルとなっている。同地震は、地震動だけでなく、地殻変動と津波による甚大な被害をもたらした。人工衛星の合成開口レーダー画像解析により、輪島市西部で最大4 m程度、珠洲市北部で最大2 m程度の隆起が検出された^{4.1-1)}。また、津波の現地調査により、石川県能登町や珠洲市で4 m以上の浸水高や、新潟県上越市で5 m以上の遡上高が観測された^{4.1-1)}。

4.1.1 地震諸元

気象庁が決定した令和6年能登半島地震の本震の諸元^{4.1-2)}は表4.1-1の通りである。

表 4.1-1 地震諸元

発震時	2024年1月1日16時10分22.57秒
マグニチュード	7.6
震源位置	北緯37.496度、東経137.270度、深さ16 km

4.1.2 震度分布

図4.1-1に本震の震度分布^{4.1-3)}を示す。この地震では、防災科学技術研究所（以下、「防災科研」又は「K-NET」、「KiK-net」と略記する）のK-NET 富来観測点および石川県自治体震度計の輪島市門前町走出

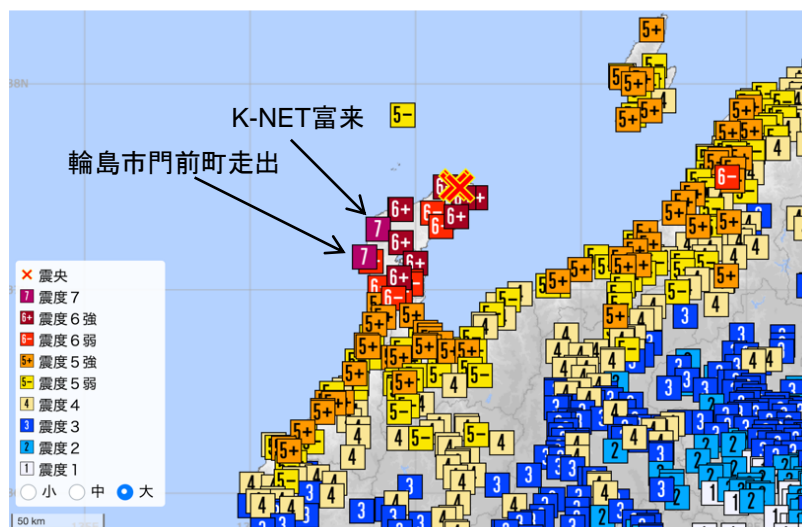


図 4.1-1 令和6年能登半島地震の震度分布図^{4.1-3)}

町走出観測点で震度7が記録された。また、能登地方の広い範囲を震度6強の揺れが襲い、石川県から新潟県にかけての沿岸平野部および佐渡島を中心に震度5強の地震動が観測された。なお、本震は北陸地方に限らず本州全域～四国の震度観測点において広範に観測され、関東平野・大阪平野の一部地域や濃尾平野では周囲よりも大きい震度4が記録された。更に遠方にある九州の大分平野、佐賀平野においても震度2の地震動が記録された。

余震は能登半島西端から半島東側海域の約150kmの範囲に集中しており、本震発生から8月28日9時までの間に震度1以上を観測した地震は1,915回発生している^{4.1-4)}。その内、最大震度5強以上の地震の発生回数は10回(震度5強:8回、震度6弱:2回)である^{4.1-4)}。

4.1.3 津波シミュレーションと津波波源モデル

能登半島地震の発生直後、米国地質調査所(USGS)による震源パラメータ^{4.1-5)}を参考にした1枚断層モデルによる津波シミュレーションを実施し、速報結果を観測津波波形との比較と共に国際地震工学センターのHPで公表した。その後、国土地理院が推定した2枚断層モデル^{4.1-6)}による津波シミュレーションも実施した。その結果(図4.1-2)、能登半島各地で2~3メートル超の津波が到達した可能性があることが分かった(最大3.6m;石川県珠洲市宝立町)。能登半島の東側では、佐渡島との間にある東側の断層で発生した津波が沖合で回り込んできたことにより、津波が高くなったと推測される。

能登半島地震による津波は、日本列島のみならず沿海州や韓国東岸でも記録された。能登半島沖では、「日本海における大規模地震に関する調査検討会(MLIT)」(国土交通省・内閣府・文部科学省)^{4.1-7)}及び「日本海地震・津波調査プロジェクト(JSPJ)」(文部科学省)^{4.1-8)}によって海底活断層が確認されていた。これらの海底活断層モデルを基に、観測された津波波形のうち、日本海沿岸の6つの波浪計と12の検潮儀で記録された津波波形に加え、能登半島周辺の53観測点で記録されたGNSSデータ^{4.1-6)}を用いて、各活断層セグメント上のすべり量と地震モーメントを推定した^{4.1-9)}。能登半島北岸に位置し、南東に傾斜しているJSPJモデルのNT4、NT5、NT6断層では(NT6の長さとは若干変更)、地震時のすべり量はそれぞれ3.5m、3.2m、3.2mであった。北西端のNT8では1.0mと小さい。これら4つの断層の総延長は約100kmで、地震モーメントは 1.9×10^{20} Nm ($M_w=7.5$)であった。

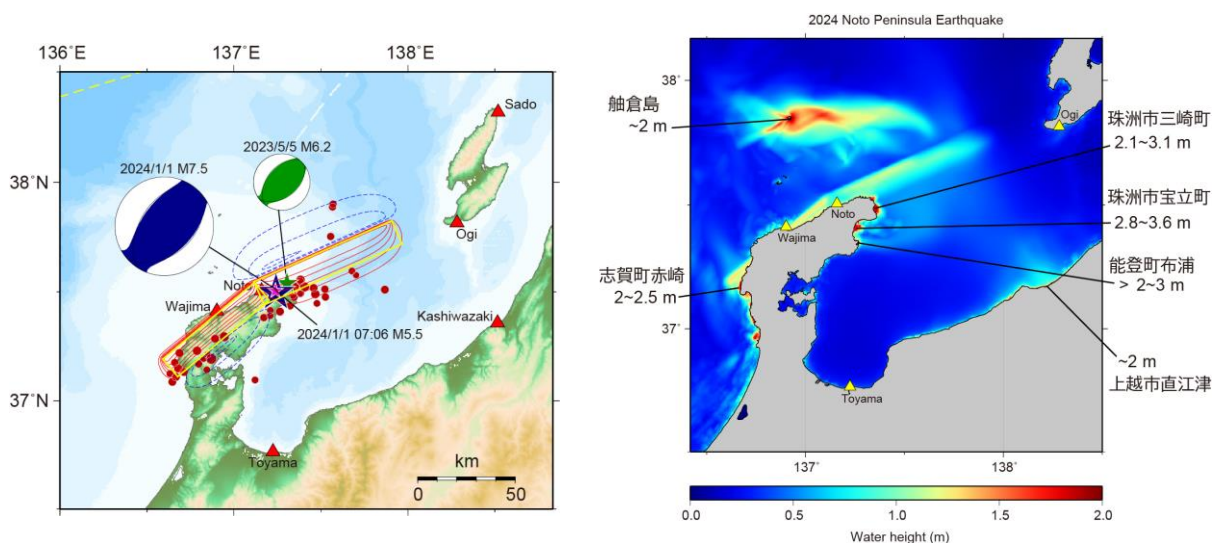


図4.1-2 (左) 津波シミュレーションで波源とした地殻変動(赤線:隆起、青破線:沈降)。国土地理院が推定した断層モデル(黄色四角)による。(右) 計算した津波の最大波高分布

同様の傾向は MLIT モデルでもみられ、本震時のすべり量は、北西傾斜の F42 断層で 0.4 m、0.0 m、南東傾斜の F43 断層で 3.5 m、2.1 m、地震モーメントは 1.85×10^{20} Nm ($M_w=7.4$) であった。これらの津波波源モデルについては、日本地震工学会誌の特集^{4.1-10)}で詳しく解説している。

参考文献

- 4.1-1) 地震調査委員会：令和 6 年能登半島地震の評価, 2024 年 4 月閲覧
(https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2024/20240101_noto_3.pdf)
- 4.1-2) 気象庁: 震源リスト, 2024 年 6 月閲覧
(https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/daily_map/)
- 4.1-3) 気象庁: 震度データベース, 2024 年 1 月閲覧
(<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html#20240101161022>)
- 4.1-4) 気象庁: 令和 6 年能登半島地震 (震度 1 以上) の日別震度回数・積算地震回数図, 2024 年 8 月閲覧
(<https://www.data.jma.go.jp/kanazawa/data/news/notojisinkaisu.pdf>)
- 4.1-5) 米国地質調査所：能登半島地震の震源パラメータ, 2024 年 1 月閲覧
(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000m0xl/>)
- 4.1-6) 国土地理院：2024 年 1 月 1 日令和 6 年能登半島地震の震源断層モデル (暫定) , 2024 年 1 月閲覧
(<https://www.gsi.go.jp/cais/topic20240101Noto.html>)
- 4.1-7) 日本海における大規模地震に関する調査検討会 (2014)：日本海における大規模地震に関する調査検討会報告書, 2024 年 1 月閲覧
(https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinchousa/houkoku/Report.pdf)
- 4.1-8) 日本海地震・津波調査プロジェクト (2013-2020)：「日本海地震・津波調査プロジェクト」成果報告書, 2024 年 1 月閲覧
(https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/project/Japan_Sea/houkokusyo.html)
- 4.1-9) Fujii and Satake: Earth, Planets Space, 76. 44. Slip distribution of the 2024 Noto Peninsula earthquake (M_{JMA} 7.6) estimated from tsunami waveforms and GNSS data. <https://doi.org/10.1186/s40623-024-01991-z>, 2024
- 4.1-10) 佐竹健治, 藤井雄士郎: 令和 6 年能登半島地震による津波, 日本地震工学会誌 (第 52 号 2024 年 6 月) 特集「令和 6 年能登半島地震」, 10-13, 2024

4.2 強震観測記録と過去に観測された代表的な強震記録との比較

4.2.1 強震観測記録

本震時の強震観測記録は、防災科研の K-NET および KiK-net、気象庁震度観測点のものが公開されている(4.2-1), 4.2-2)。図 4.2-1 に地表最大加速度および最大速度の分布(水平動2成分合成)、図 4.2-2 には震央と震度 6 強以上を観測した地点を含めた能登半島における観測地点を示す。図 4.2-3~図 4.2-22 に図 4.2-2 の観測地点における観測記録の加速度波形、加速度応答スペクトル及び加速度応答スペクトル S_a と変位応答スペクトル S_d の関係(S_a-S_d 曲線)を示す。加速度応答スペクトルと S_a-S_d 曲線の減衰定数は 5% として算定した。なお、気象庁門前の記録(図 4.2-12) は、波形データの時刻精度に異常が認められているが、震度 7 を記録したため、参考として示す。

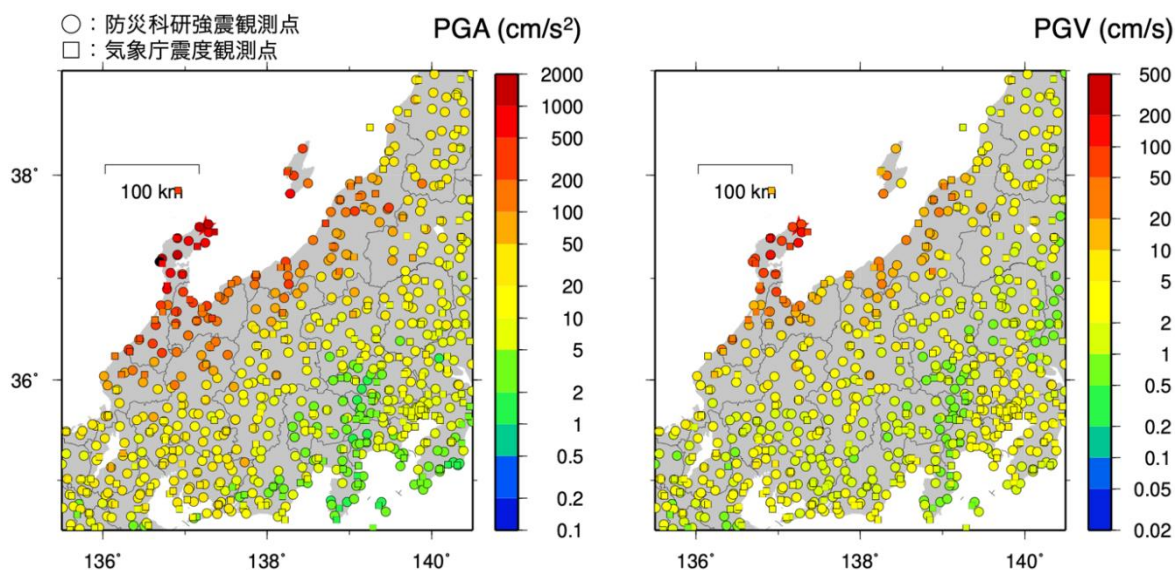


図 4.2-1 地表最大加速度 (PGA) および地表最大速度 (PGV) 分布 (水平動成分)

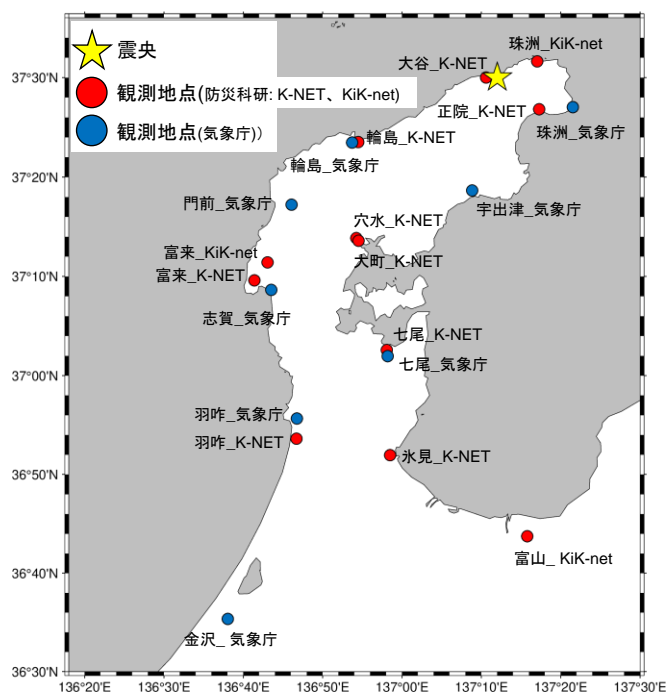


図 4.2-2 観測地点と震央 (震度 6 強以上を含む)

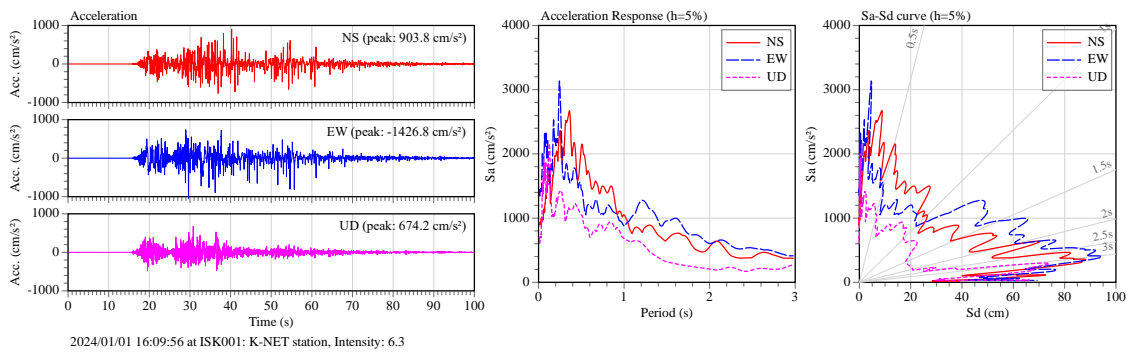


図 4.2-3 大谷 (ISK001、K-NET、石川県 珠洲市) の観測記録 ($h=5\%$)

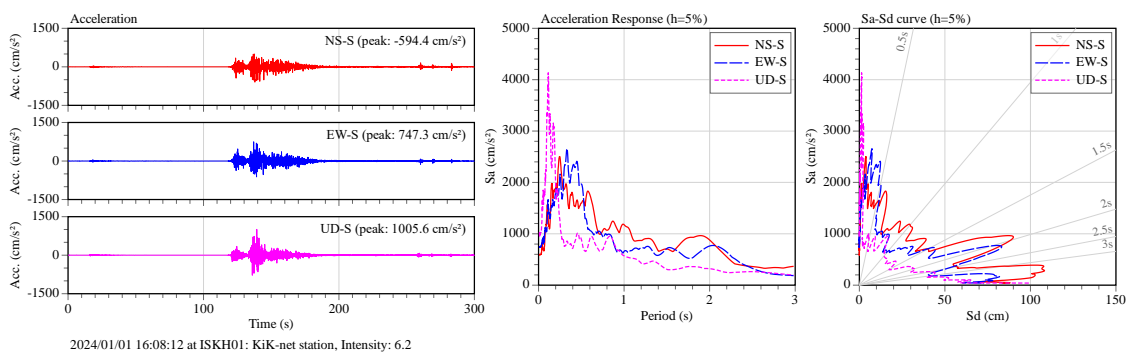


図 4.2-4 珠洲 (ISKH01、KiK-net、石川県 珠洲市) の観測記録 ($h=5\%$)

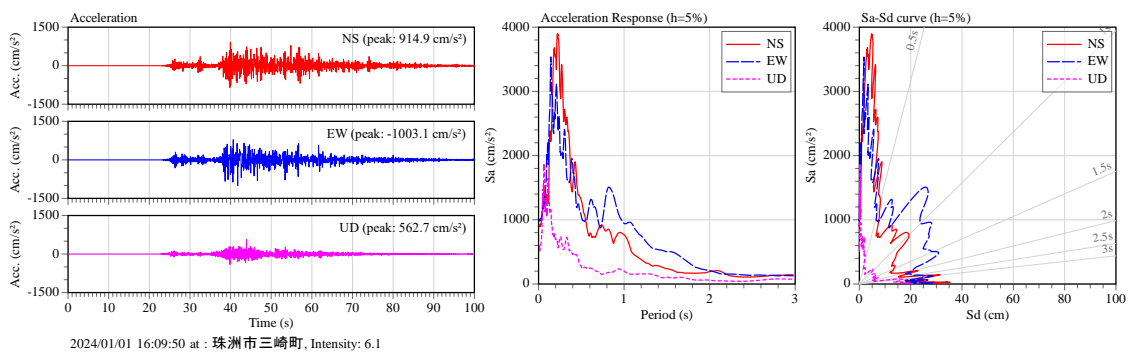


図 4.2-5 珠洲 (47274、気象庁、石川県 珠洲市) の観測記録 ($h=5\%$)

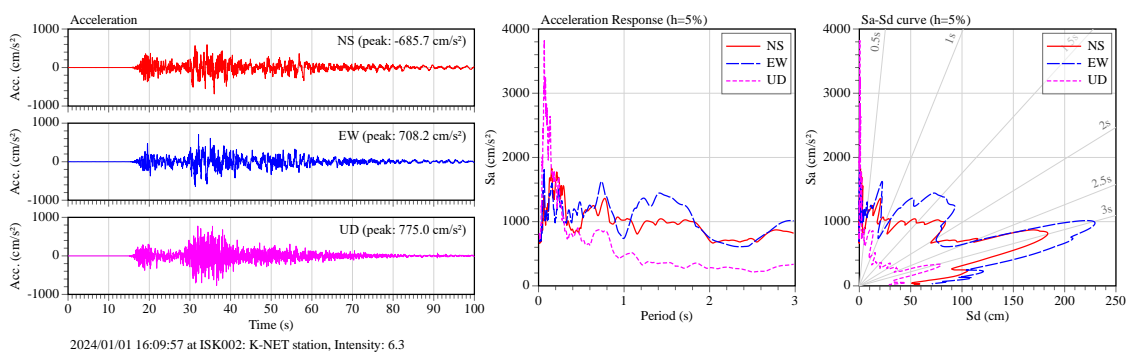


図 4.2-6 正院 (ISK002、K-NET、石川県 珠洲市) の観測記録 ($h=5\%$)

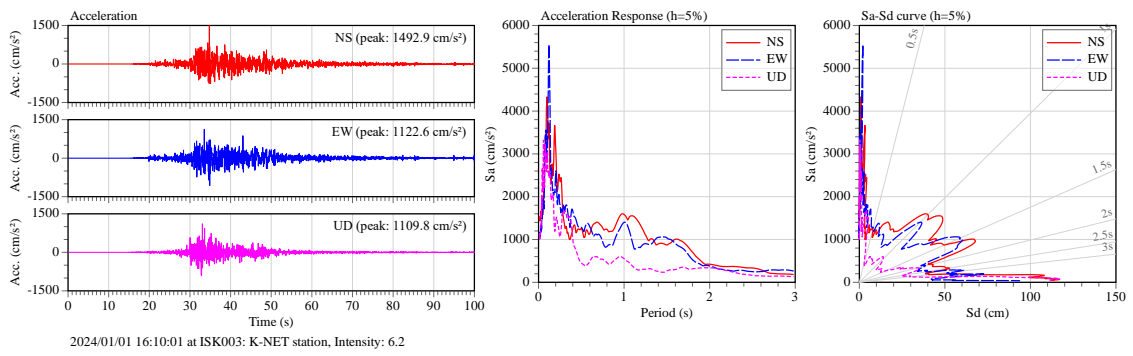


図 4.2-7 輪島 (ISK003、K-NET、石川県 輪島市) の観測記録 ($h=5\%$)

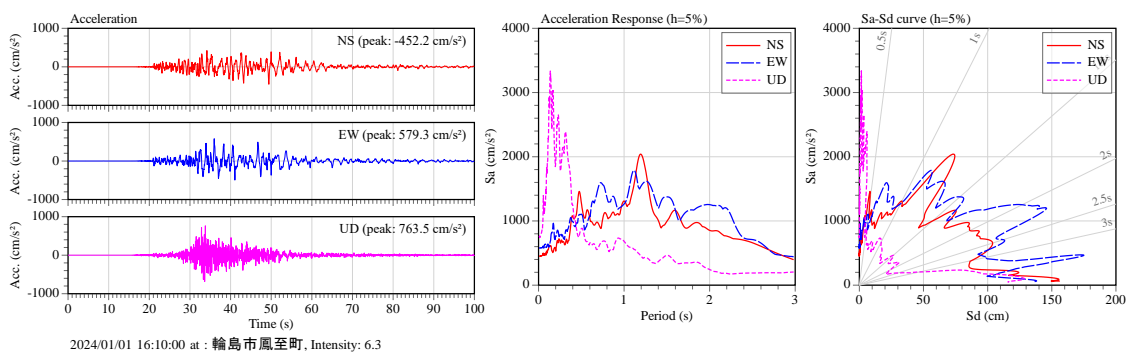


図 4.2-8 輪島 (47600、気象庁、石川県 輪島市) の観測記録 ($h=5\%$)

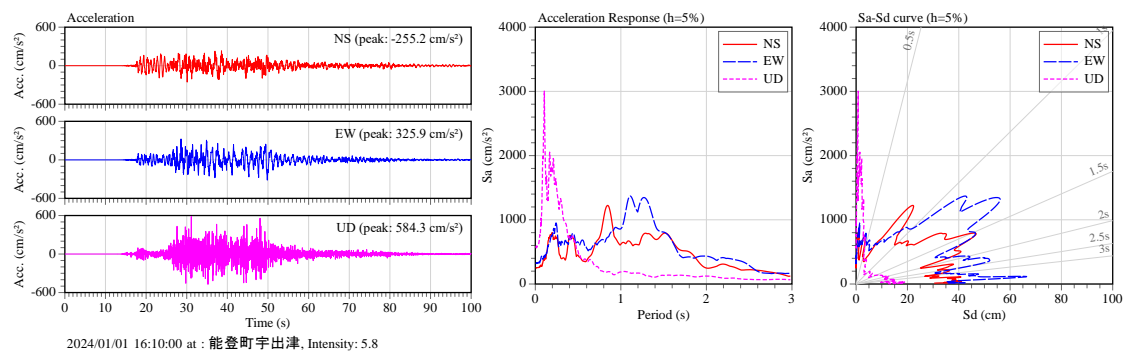


図 4.2-9 宇出津 (42325、気象庁、石川県 鳳珠郡 能登町) の観測記録 ($h=5\%$)

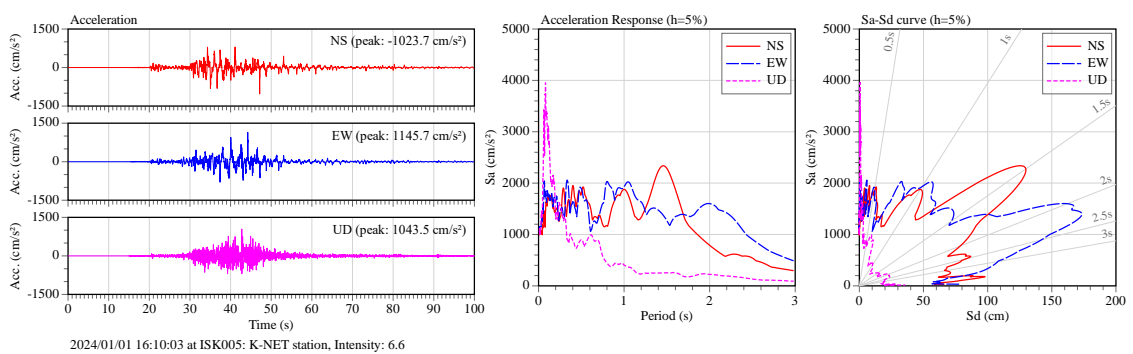


図 4.2-10 穴水 (ISK005、K-NET、石川県 鳳珠郡 穴水町) の観測記録 ($h=5\%$)

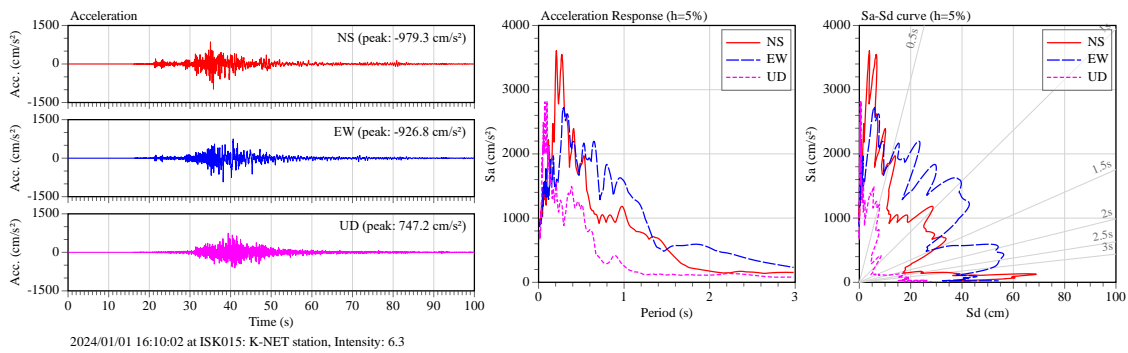
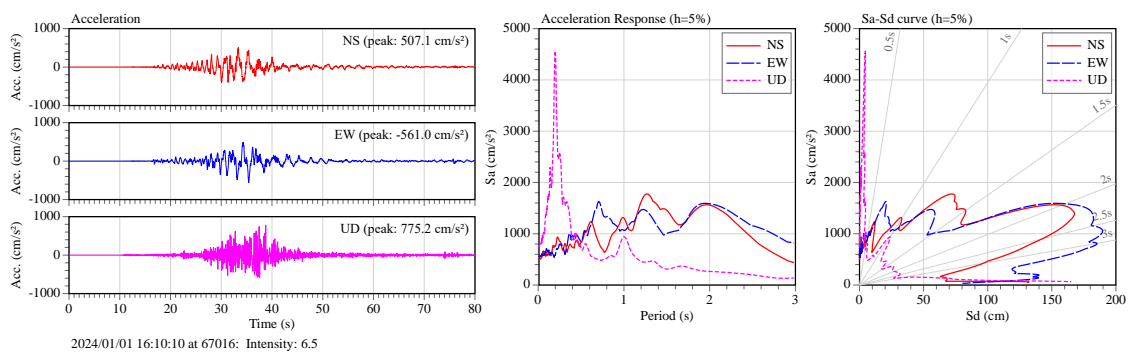


図 4.2-11 大町 (ISK015、K-NET、石川県 鳳珠郡 穴水町) の観測記録 ($h=5\%$)



※波形データの時刻精度に異常が認められている。

図 4.2-12 門前 (67016、気象庁、石川県 輪島市) の観測記録 ($h=5\%$)

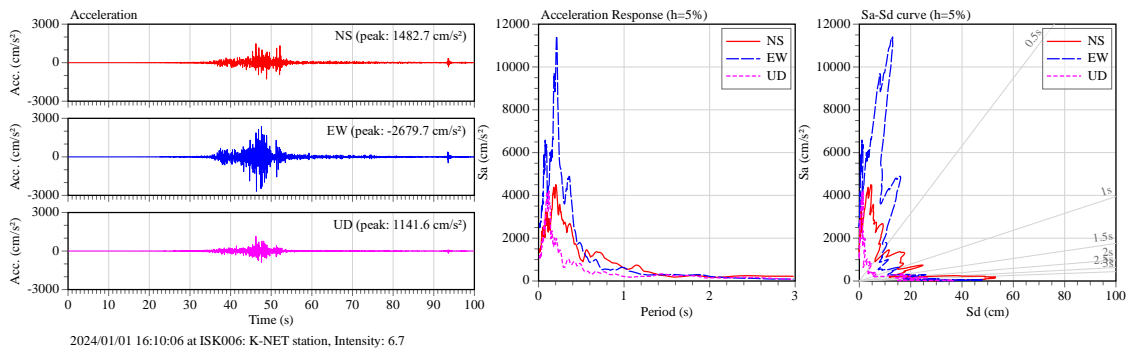


図 4.2-13 富来 (ISK006、K-NET、石川県 羽咋郡 志賀町) の観測記録 ($h=5\%$)

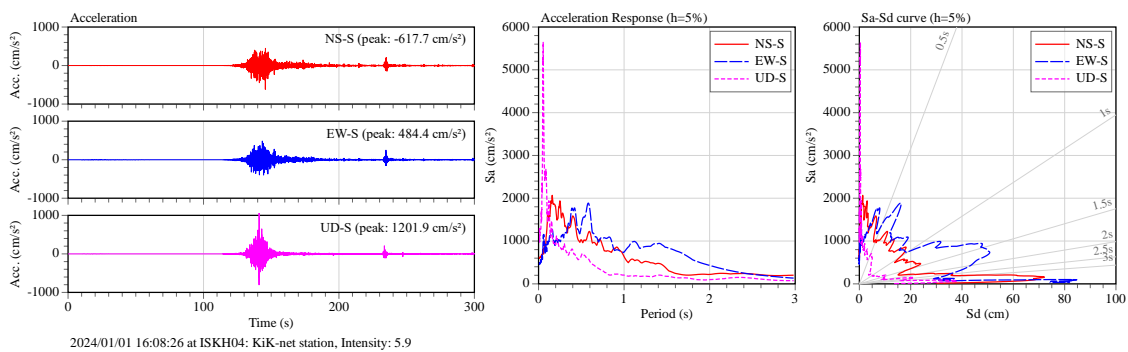


図 4.2-14 富来 (ISKH04、KiK-net、石川県 羽咋郡 富来町) の観測記録 ($h=5\%$)

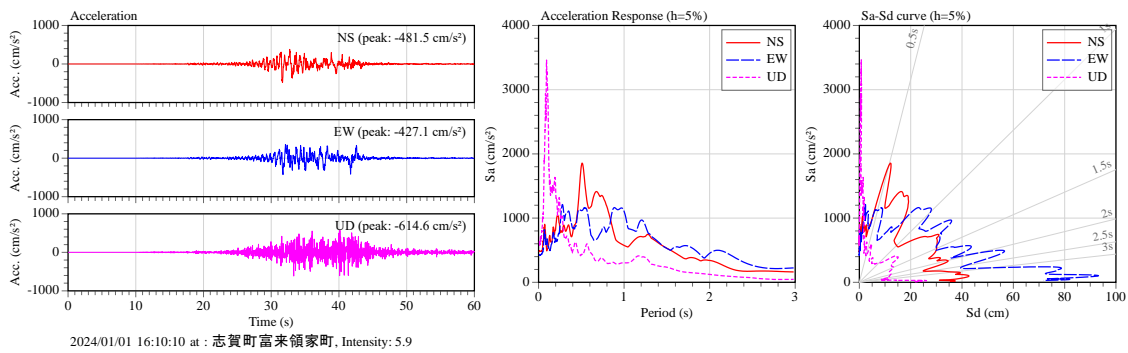


図 4.2-15 志賀 (42324、気象庁、石川県 羽咋郡 志賀町) の観測記録 ($h=5\%$)

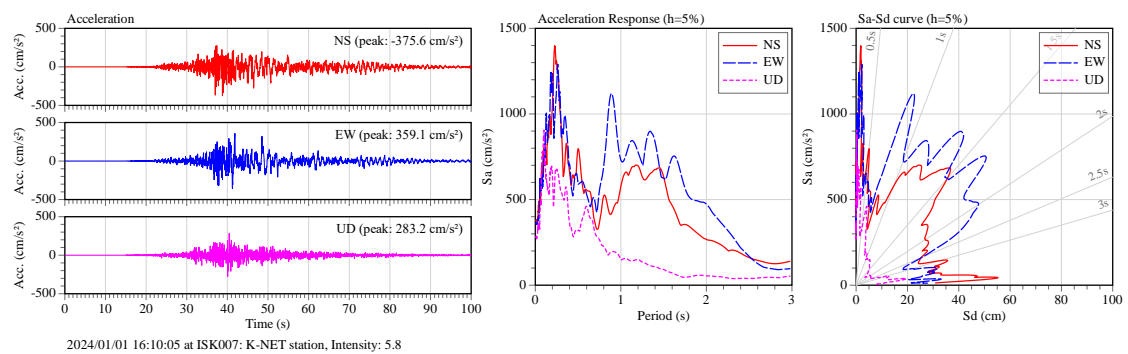


図 4.2-16 七尾 (ISK007、K-NET、石川県 七尾市) の観測記録 ($h=5\%$)

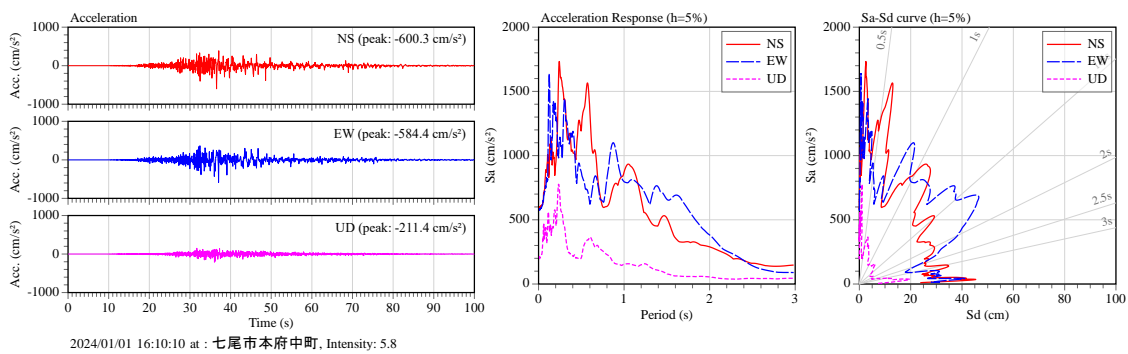


図 4.2-17 七尾 (41333、気象庁、石川県 七尾市) の観測記録 ($h=5\%$)

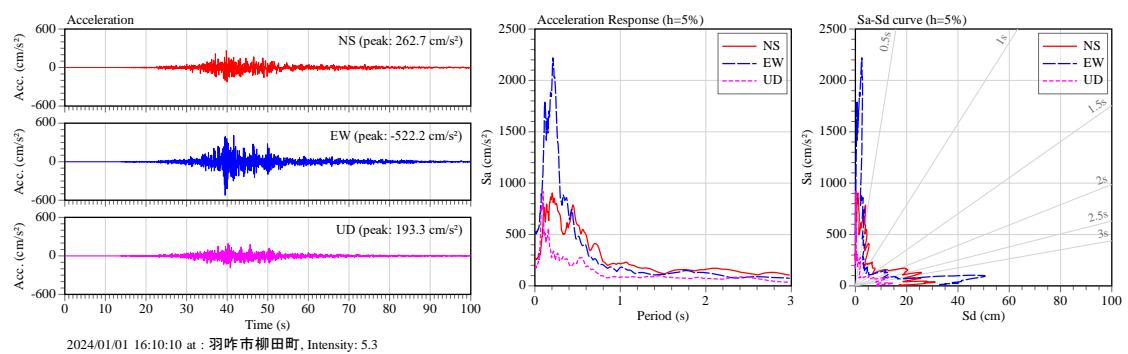


図 4.2-18 羽咋 (47275、気象庁、石川県 羽咋市) の観測記録 ($h=5\%$)

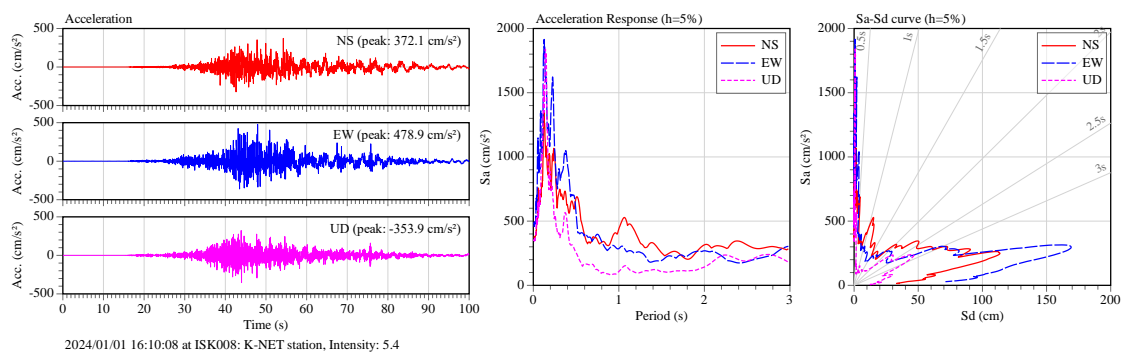


図 4.2-19 羽咋 (ISK008、K-NET、石川県 羽咋市) の観測記録 ($h=5\%$)

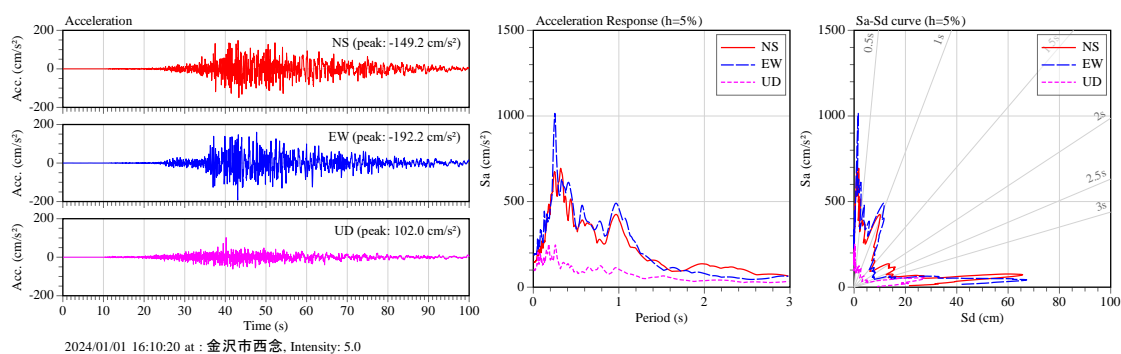


図 4.2-20 金沢 (47605、気象庁、石川県 金沢市) の観測記録 ($h=5\%$)

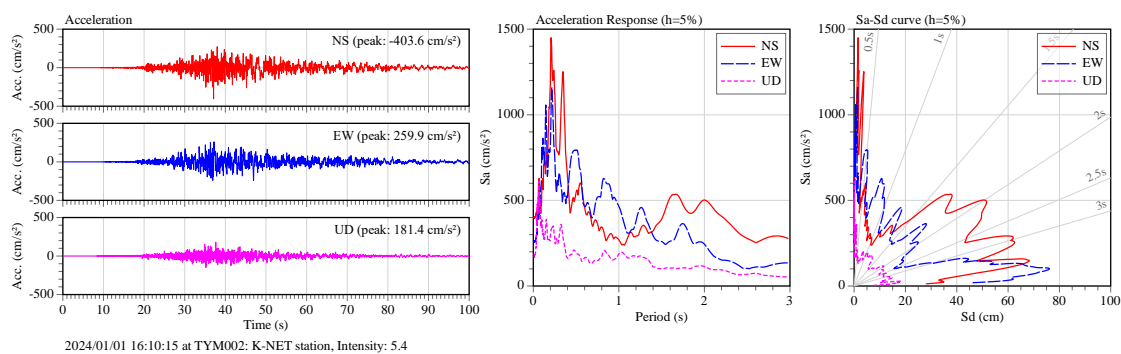


図 4.2-21 氷見 (TYM002、K-NET、富山県 氷見市) の観測記録 ($h=5\%$)

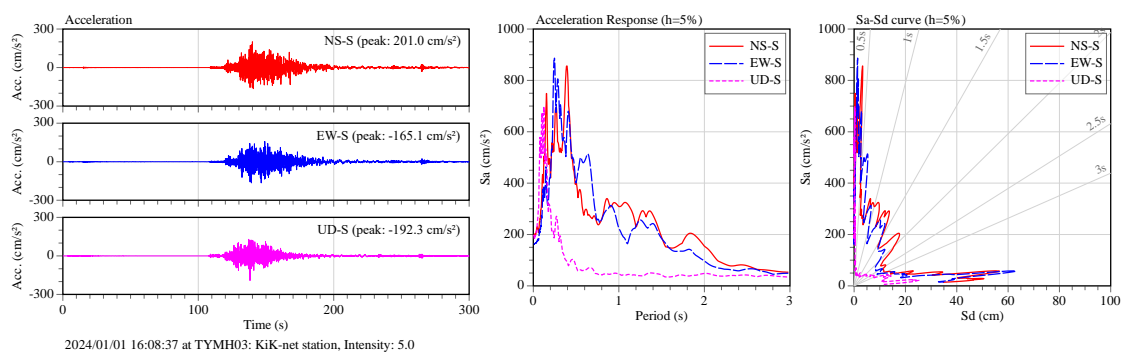


図 4.2-22 富山 (TYMH03、KiK-net、富山県 富山市) の観測記録 ($h=5\%$)

4.2.2 過去に観測された代表的な強震記録との比較

図 4.2-23～図 4.2-29 に過去に観測された代表的な強震記録と K-NET 富来、KiK-net 富来、気象庁珠洲、KiK-net 珠洲、K-NET 輪島、気象庁輪島、K-NET 穴水、K-NET 正院の比較を加速度応答スペクトルと S_a-S_d 曲線で示す。なお、加速度応答スペクトルと S_a-S_d 曲線の減衰定数は 5% として算定した。図中には、表 4.2-1 に示す過去に観測された日本の代表的な強震記録に加えて、建築基準法に規定される設計用地震動の応答スペクトル（極めて稀に発生する地震動、地震地域係数 $Z=1.0$ 、減衰定数は 5%、表層地盤の増幅は平成 12 年建設省告示第 1457 号第 10 の方法を準用する。以下「BSLJ」と呼称する。）を示す。なお、昭和 55 年建設省告示第 1793 号より、石川県のうち輪島市、珠洲市、鳳至郡、珠洲郡の地震地域係数 Z は 0.9 と定められているが、本資料の BSLJ は地震地域係数 $Z=1.0$ とし、算定した。建物の等価周期を想定した周期 1 秒、1.5 秒、2 秒を黒の斜線で示す。K-NET 穴水、気象庁輪島以外の観測地点については、南北成分（NS）、東西成分（EW）のうち S_a-S_d 曲線の形状が大きい方を示す。

表 4.2-1 日本の代表的な強震観測記録

年	月	日	地震の名称	マグニチュード (Mj)	データソース	地点名	サイトID	NS/EW
1995	1	17	兵庫県南部地震	7.3	JMA	JMA_KOBE	-	NS
1995	1	17	兵庫県南部地震	7.3	RTRI	鷹取	-	NS
2007	7	16	新潟県中越沖地震	6.8	K-NET	柏崎	NIG018	NS
2011	3	11	東北地方太平洋沖地震	9	K-NET	築館	MYG004	NS
2016	4	16	熊本地震	7.3	KiK-net	益城	KMMH16	EW
2023	5	5	石川県能登半島地震	6.3	K-NET	正院	ISK002	EW

K-NET・KiK-NET: 防災科学技術研究所, JMA: 気象庁, RTRI: 鉄道総合技術研究所

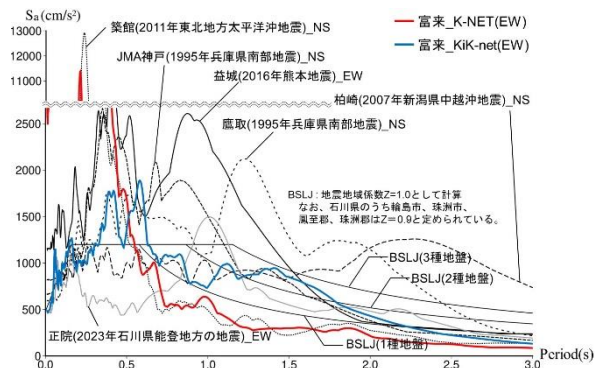
S_a-S_d 曲線より、K-NET 富来の EW 成分は、東北地方太平洋沖地震（2011 年）の K-NET 築館と似た形状を示した。一方、KiK-net 富来の加速度応答スペクトル S_a の最大値は、K-NET 富来より小さな値を示した。

気象庁珠洲の EW 成分は、周期 1 秒以上の範囲で石川県能登地方の地震（2023 年）の K-NET 正院より小さい S_a-S_d 曲線を示した。一方、KiK-net 珠洲の NS 成分は、加速度応答スペクトル S_a の最大値においては気象庁珠洲より小さかったが、周期 2 秒以上の範囲で気象庁珠洲、兵庫県南部地震（1995 年）の JMA 神戸及び熊本地震（2016 年）の KiK-net 益城より大きな S_a-S_d 曲線を示した。

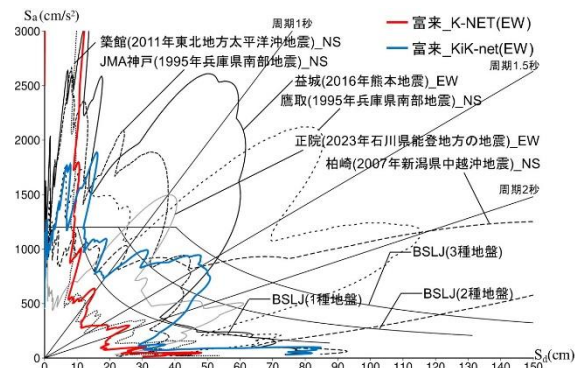
K-NET 輪島の NS 成分は、周期 1 秒以上の範囲において、兵庫県南部地震（1995 年）の JMA 神戸より大きな S_a-S_d 曲線を示した。気象庁輪島の NS 成分は、兵庫県南部地震（1995 年）の JR 鷹取と似た形状を示した。また、気象庁輪島の EW 成分は、新潟県中越沖地震（2007 年）の K-NET 柏崎と似た形状を示した。

K-NET 穴水の NS 成分は、兵庫県南部地震（1995 年）の JR 鷹取よりも大きな S_a-S_d 曲線を示した。K-NET 穴水の EW 成分は、新潟県中越沖地震（2007 年）の K-NET 柏崎と似た形状を示した。

K-NET 正院の EW 成分の変位応答スペクトル S_d は、新潟県中越沖地震（2007 年）の K-NET 柏崎と同等または大きな値を示した。

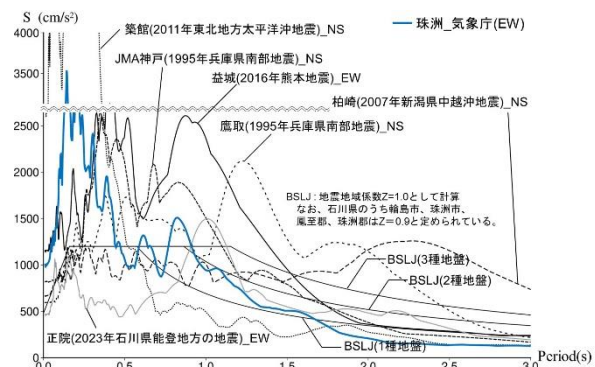


加速度応答スペクトル S_a

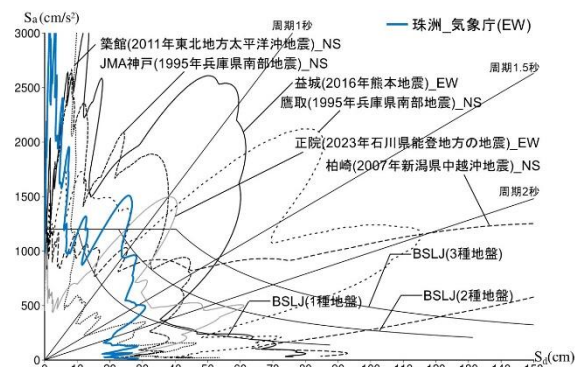


S_a-S_d 曲線

図 4.2-23 代表的な強震記録との比較 ($h=5\%$) (富来_K-NET、富来_KiK-net)

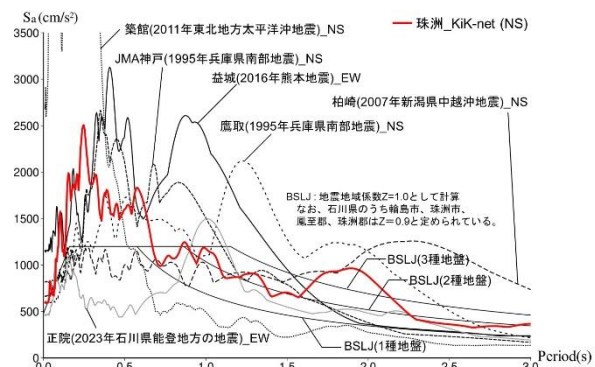


加速度応答スペクトル S_a

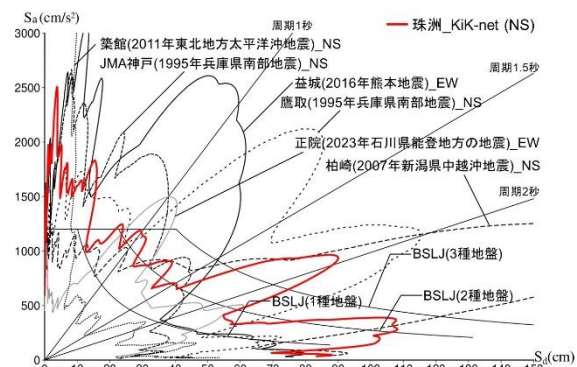


S_a-S_d 曲線

図 4.2-24 代表的な強震記録との比較 ($h=5\%$) (珠洲_気象庁)

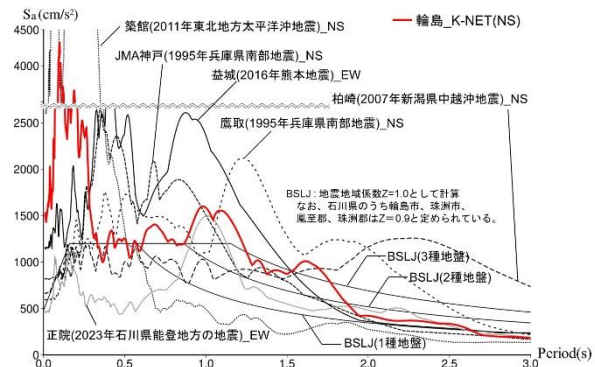


加速度応答スペクトル S_a

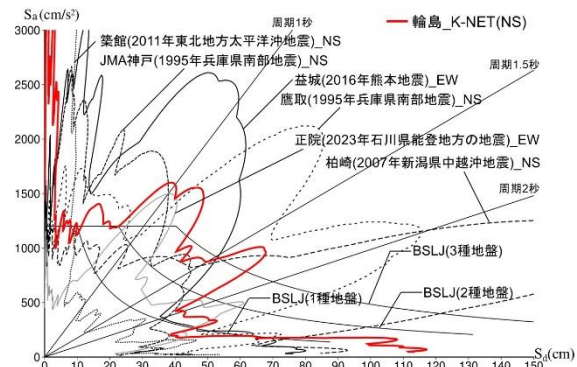


S_a-S_d 曲線

図 4.2-25 代表的な強震記録との比較 ($h=5\%$) (KiK-net 珠洲)

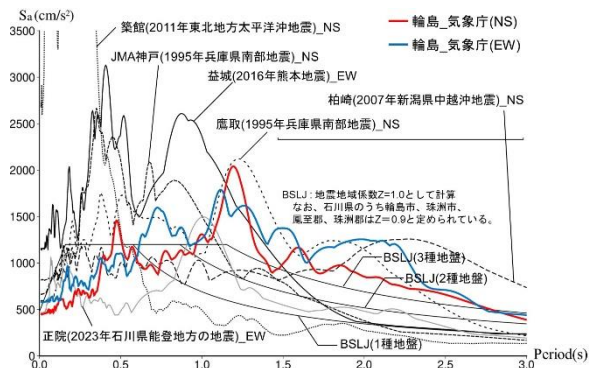


加速度応答スペクトル S_a

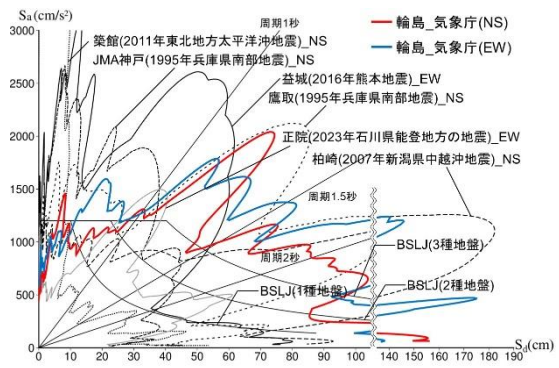


S_a-S_d 曲線

図 4.2-26 代表的な強震記録との比較 ($h=5\%$) (K-NET 輪島)

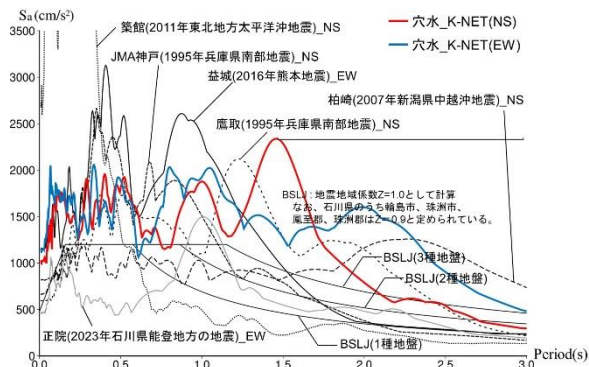


加速度応答スペクトル S_a

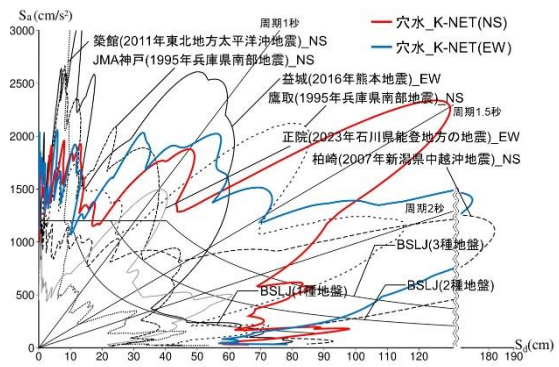


S_a-S_d 曲線

図 4.2-27 代表的な強震記録との比較 ($h=5\%$) (気象庁輪島)

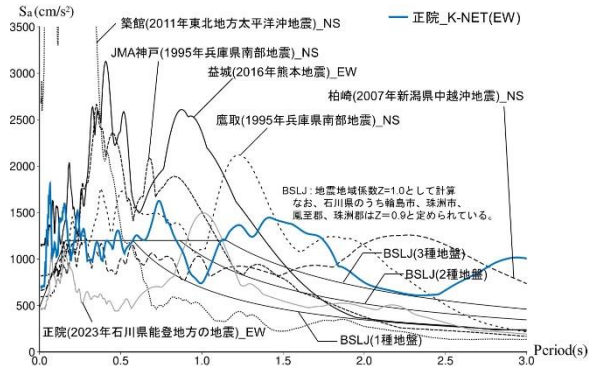


加速度応答スペクトル S_a

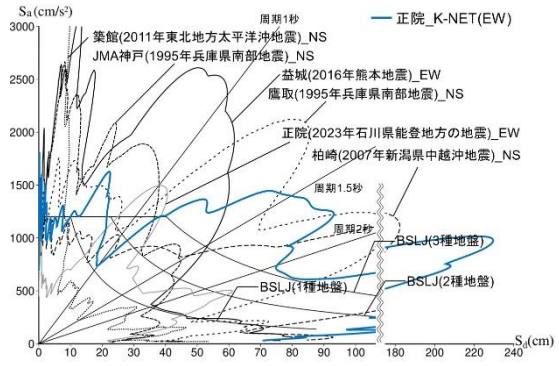


S_a-S_d 曲線

図 4.2-28 代表的な強震記録との比較 ($h=5\%$) (K-NET 穴水)



加速度応答スペクトル S_a



S_a-S_d 曲線

図 4.2-29 代表的な強震記録との比較 ($h=5\%$) (K-NET 正院)

K-NET 富来、KiK-net 富来、気象庁珠洲の EW 成分は周期 1 秒以下の範囲、K-NET 輪島の NS 成分は周期 1 秒から 2 秒の範囲、気象庁輪島の NS 成分と EW 成分は周期 1 秒以上の範囲、K-NET 穴水の NS 成分は周期 1.5 秒、K-NET 穴水の EW 成分と KiK-net 珠洲の NS 成分は周期 2 秒、K-NET 正院の EW 成分は周期 2 秒以上の範囲で S_a-S_d 曲線が大きな値を示した。

参考文献

- 4.2-1) 国立研究開発法人防災科学研究所: 強震観測網 (K-NET, KiK-net) , 2024 年 1 月閲覧 (<https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>)
- 4.2-2) 気象庁: 長周期地震動の計測結果, 2024 年 2 月, 2024 年 7 月閲覧 (<https://www.data.jma.go.jp/eew/data/ltpgm/event.php?eventId=20240101161010>)

4.3 弾塑性応答解析を用いた強震観測記録の特徴

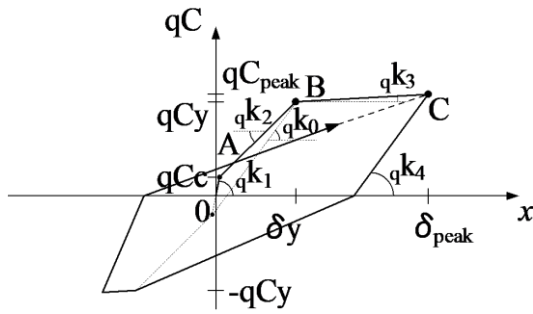
各地の揺れの建築物への影響の程度を把握する参考とするため、観測地震波を外力として、弾塑性応答解析を行った。建築物に地震力が作用した場合、水平方向に、変形と復元力が建築物に生じる。この変形と復元力の関係は、復元力特性と言われ、変形の小さいうちは、弾性関係にあり、変形が大きくなるにつれて、建築物の一部分の塑性化が進むことにより、弾塑性関係となる。復元力特性は、建築物の構造種別、構造形式、部材等に応じて異なるが、建築物全体を1質点に模擬した1質点時刻歴弾塑性応答解析により、建築物の水平変形、復元力を大まかに推定することができる^{4.3-1)}。

令和6年(2024年)能登半島地震では、震度6強以上が数多く観測された。そこで、表4.3-1に示す防災科研と気象庁の強震観測記録を用いて、1質点系の建物応答変位について弾塑性応答解析を行った。なお、防災科研_KiK-netの場合は、震度6強以上の地点が1つのみなので、震度6弱のKiK-net富来(志賀町大福寺ニ)も分析に加えた。

表 4.3-1 分析に用いた強震観測記録

データソース	計測震度	地点名	サイト ID
気象庁_地方公共団体	6.5	石川県輪島市門前町走出	
気象庁	6.2	石川県輪島市鳳至町	
気象庁	6.1	石川県珠洲市三崎町	
気象庁_地方公共団体	6.2	石川県能登町松波	
気象庁_地方公共団体	6.2	石川県七尾市能登島向田町	
気象庁_地方公共団体	6.1	石川県七尾市垣吉町	
防災科研_K-NET	6.6	K-NET 富来(石川県志賀町香能)	ISK006
防災科研_K-NET	6.5	K-NET 穴水町大町ほ	ISK005
防災科研_K-NET	6.3	K-NET 穴水町大町ろ	ISK015
防災科研_KiK-net	6.2	KiK-net 珠洲市折戸町	ISKH01
防災科研_K-NET	6.2	K-NET 珠洲市正院町	ISK002
防災科研_K-NET	6.2	K-NET 珠洲市大谷町	ISK001
防災科研_K-NET	6.2	K-NET 輪島市河井町	ISK003
防災科研_KiK-net	5.9	KiK-net 富来(志賀町大福寺ニ)	ISKH04

図4.3-1に、1質点弾塑性時刻歴解析の復元力特性を示す。復元力特性は、鉄筋コンクリート部材実験を基に作成され、最大点指向型のトリリニア武田モデルとした。このモデルの特徴は、ひび割れ点A、降伏点Bで剛性が低下すること、降伏点後の除荷時剛性 q_k4 がピーク点の変位 δ_{peak} に応じて低下することである。他の設定は、これまでの応答値の検討結果により、降伏点のせん断力係数(q_{Cy})を0.2(-)、剛性低下率を1/1000(-)、減衰定数(h)を5(%)等とした^{4.3-1)}。地震波の継続時間は、データが用意されている時間(120、300秒)とした。



トリリニア武田モデル
降伏点後の除荷時剛性: ${}_q k_4 = {}_q k_0 \left(\frac{\delta y}{\delta_{peak}} \right)^{0.4}$

他の関係式:

$${}_q k_1 = 2.2 \cdot \frac{{}_q C_y}{\delta y} \quad {}_q k_2 = \frac{{}_q k_1}{3}$$

$${}_q k_3 = \frac{1}{1000} \frac{{}_q C_y}{\delta y} \quad \frac{{}_q C_y}{\delta y} = \frac{k_y}{mg} = {}_q k_y$$

$$qCc = 0.4 \cdot qCy$$

注)

(1) qC : せん断力係数

$$\left(qC = \frac{\text{せん断力}(Q)}{\text{重量}(m \cdot g)} \right)$$

(3) qC_{peak} : ピーク点Cにおけるせん断力係数

(5) ${}_q k_1, {}_q k_2, {}_q k_3$: 剛性係数 (1/cm)

$$\left({}_q k_i = \frac{\text{初期剛性 } k_i}{\text{重量}(m \cdot g)} \right)$$

(7) h : 減衰定数 $h (= 0.05)$

(2) qCc, qCy : ひび割れ点A, 降伏点Bにおけるせん断力係数
($qCy = 0.2$)

(4) Q : せん断力 (kN) ($= k \cdot x$)

(6) 剛性低下率: 1/1000

$$\left({}_q k_3 = \frac{1}{1000} \times {}_q k_y \right)$$

(8) g : 重力加速度 ($= 980 \text{ (cm/sec}^2\text{)}$)

図 4.3-1 トリリニア武田モデルの復元力特性^{4.3-2)}

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_y}} = \frac{2\pi}{\sqrt{{}_q k_y \cdot g}} = 2\pi \sqrt{\frac{\delta y}{qC_y \cdot g}} \quad \text{式(4.3-1)}$$

図 4.3-2 は、強震観測記録を(i) 珠洲市、能登町、(ii) 輪島市、(iii) 穴水町、七尾市、志賀町 (富来) に分類し、0.1、0.15、0.2、0.3~4.0、4.5、5.0(s)の各周期 T (式(4.3-1))、約 30 通りについて求めた変位応答時刻歴のうち、絶対値の最大値 (peak 値) をスペクトル表示している。図 4.3-2 における周期 1 秒とは、15 階 (建物高さ約 50m) 相当の建物^{4.3-3)}の固有周期が想定される。周期 5 秒が、50 階程度の高層建物の固有周期と想定される。図中の凡例の順番は、周期 1 秒での変位応答の大きさによった。なお、分析において、水平方向の地震波のうち、最大加速度の大きい方向を選んだが、NS 方向の最大加速度が大きい地震波は EW 方向も解析し、周期 1 秒での変位応答の大きい方向を図示した。NS 方向の最大加速度が大きいのに、EW 方向の周期 1 秒での変位応答が NS 方向よりも大きい地震波は、2024 K-NET 穴水 (大町ほ) EW、2024 KiK-net 富来 (大福寺二) EW2 である。

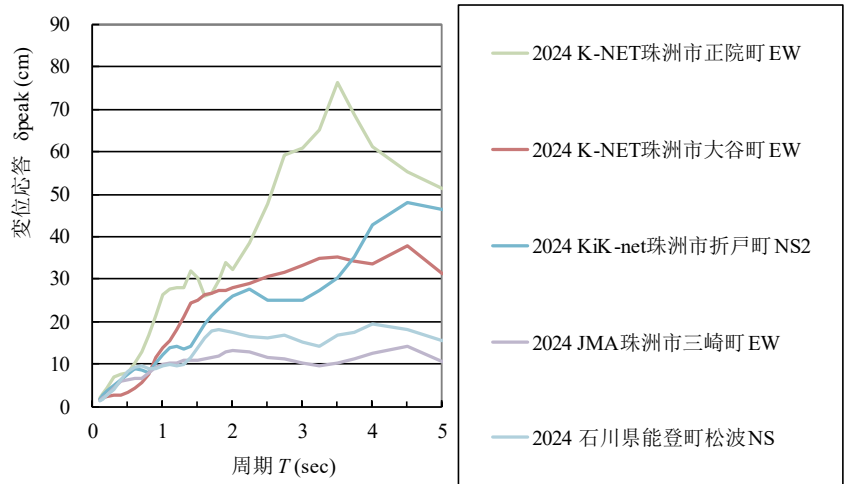
観測点のうち、1km 程度しか離れていない観測点の組合せは、K-NET 穴水町大町ほ、及び、K-NET 穴水町大町ろ、並びに、JMA 輪島市鳳至町、及び、K-NET 輪島市河井町である。これらの近接の観測点での変位応答は、周期 1 秒、EW 方向で、大きく異なった。

本震の 15 波のうち、周期 1 秒での変位応答の大きかった 6 波と、過去の地震波 10 波及び人工地震波 ((一財) 日本建築センターによる BCJ-Level2) と比較した。過去の地震波は、以下の通りである。

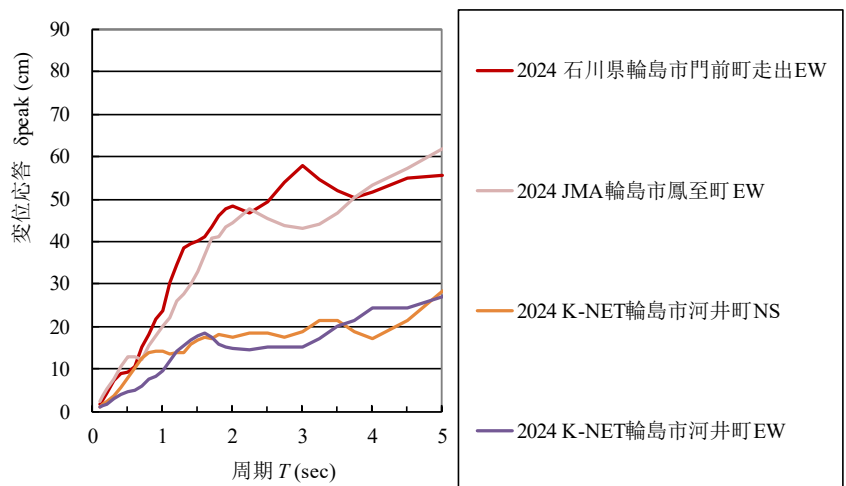
- 2018 年北海道胆振東部地震時の JMA 強震観測点の厚真町鹿沼 EW、K-NET のむかわ町松風 (鶴川 HKD126) EW、
- 2016 年熊本地震時の 2016 年 4 月 16 日発生 of 熊本県益城町宮園 EW、熊本県西原村小森 EW、

- 2011 年東北地方太平洋沖地震時の K-NET 築館 (MYG004) NS、K-NET 仙台 (MYG013) NS、
- 2007 年新潟県中越沖地震時の K-NET 柏崎 (NIG018) NS、
- 2004 年新潟県中越地震時の新潟県川口町川口 EW、
- 1995 年兵庫県南部地震時の JMA 神戸中央区中山手 NS、JR 鷹取駅 NS、
- 人工地震波の (一財) 日本建築センター模擬波 (BCJ-Level2)

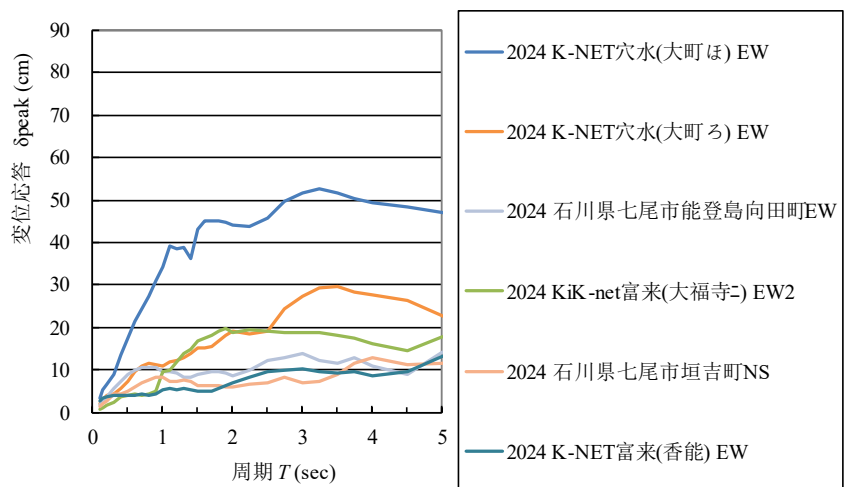
変位応答スペクトル^{4.3-1)}を、図 4.3-3 に示す。図 4.3-3 より、周期 1 秒での変位応答の最大値は、本震の K-NET 穴水町大町ほ EW が示し、 $\delta_{\text{peak}}=34.4\text{cm}$ である。周期 T を 0.1 秒から 5 秒まで比較すると、変位応答の最大値は、20160416 熊本県西原村小森 EW について、本震の K-NET 珠洲市正院町 EW が示し、 $T=3.5$ 秒に、 $\delta_{\text{peak}}=76.2\text{cm}$ である。



(i) 珠洲市、能登町



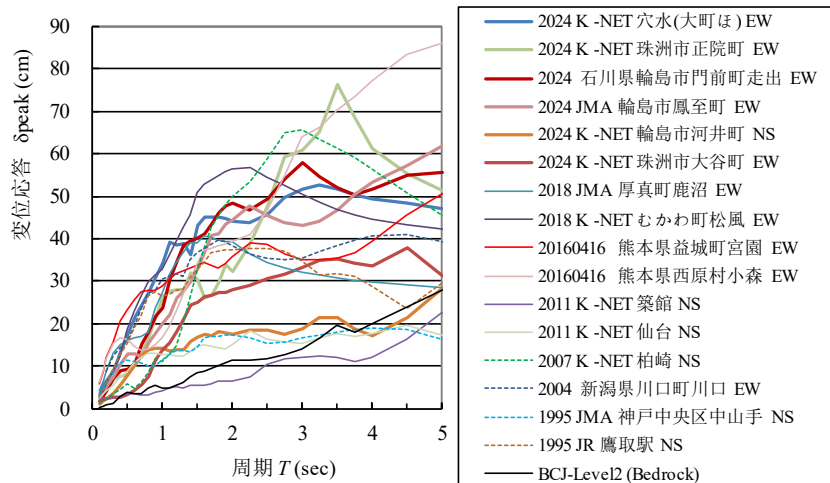
(ii) 輪島市



(iii) 穴水町、七尾市、志賀町（富来）

注) 凡例の順番は、周期が1秒の時の変位応答 δ_{peak} の大きさによる。

図 4.3-2 弾塑性応答解析結果



注) 2024 年地震波の凡例の順番は、周期が 1 秒の時の変位応答 δ_{peak} の大きさによる。

図 4. 3-3 本震と過去の地震波による変位応答スペクトル

参考文献

- 4.3-1) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所: 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震建築物被害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料 No.929, 建築研究資料 No.173, 2016 年 9 月
- 4.3-2) Inukai M., Kashima T., Saito T., Azuhata T.: Predominant periods of multi-degree-of-freedom system analysis and dynamic soil-structure interaction for building structures, Proceedings of the VI International Conference on Coupled Problems in Science and Engineering, International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) Barcelona, Spain, E-book, May 2015, pp.278-289
- 4.3-3) 気象庁: 長周期地震動による高層ビルの揺れ方, 2024 年 8 月閲覧 (<https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/choshuki/index.html#biruniyoruyurekata>)

4.4 輪島市における余震観測

主な被災地の地震動の特性と建築物の地震入力及び地震応答を調査するために、輪島市中心市街地を対象として余震観測を行った。以下に観測の概要をまとめる。

図 4.4-1 に余震観測を行った輪島市内の7カ所（地表 - 建物3カ所、地表のみ4カ所）と K-NET 輪島（防災科研）と気象庁輪島の観測地点を示す。令和6年（2024年）4月10日と4月11日に設置、5月8日に撤去作業を行った。表 4.4-1 に各観測地点の設置場所、強震計・地震計の機器名、観測期間を示す。

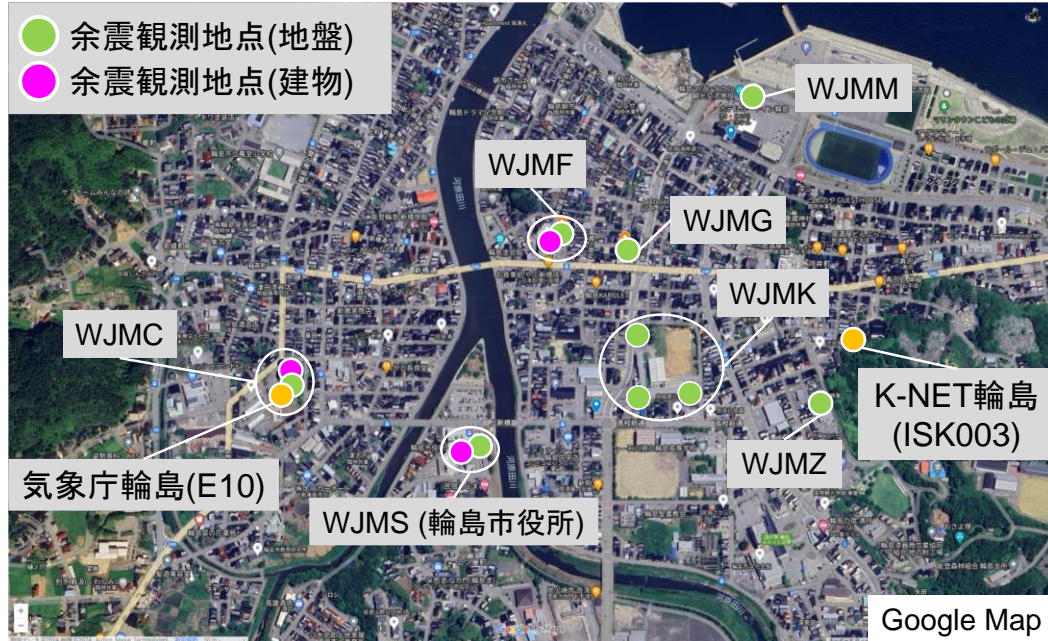


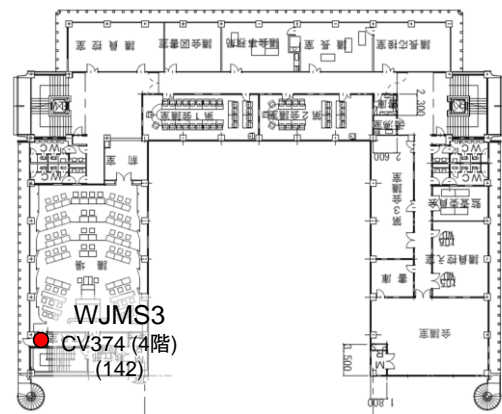
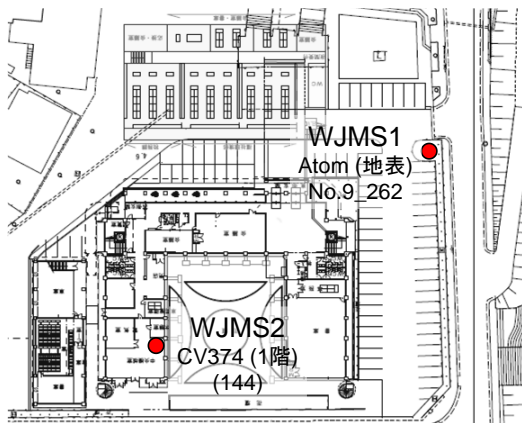
図 4.4-1 観測地点位置

表 4.4-1 各観測地点の詳細

地点名		設置場所方角	設置場所	機器名	観測期間		
WJMS (輪島市役所)	WJMS1	北東	地表	Atom	4月10日	～	4月27日
	WJMS2	南西	1階	CV374	4月10日	～	5月8日
	WJMS3	南西	4階	CV374	4月10日	～	5月8日
WJMC	WJMC1	南側	地表	Sonas	4月10日	～	5月8日
	WJMC2	南東	1階	Sonas	4月10日	～	5月8日
	WJMC3	北西	1階	Sonas	4月10日	～	5月8日
	WJMC4	南東	屋上	Sonas	4月10日	～	5月8日
	WJMC5	南西	2階	Sonas	4月10日	～	5月8日
WJMF	WJMF1	北	地表	Atom	4月10日	～	4月26日
	WJMF2	北	1階	CV374	4月10日	～	5月8日
	WJMF3	南	1階	CV374	4月10日	～	5月8日
	WJMF4	北	3階	CV374	4月10日	～	5月8日
WJMM	WJMM	東	地表	CV374	4月10日	～	5月8日
WJMG	WJMG	北	地表	Atom	4月10日	～	4月26日
WJMZ	WJMZ	北	地表	Atom	4月10日	～	4月26日
WJMK	WJMK1	北西	地表	CV374	4月10日	～	5月8日
	WJMK2	南東	地表	Atom	4月10日	～	4月27日
	WJMK3	南西	地表	Atom	4月11日	～	4月28日

4.4.1 WJMS（輪島市役所）（WJMS1、WJMS2、WJMS3：地表 - 建物）

WJMS（輪島市役所）は輪島市市街地の中心街、河原田川と鳳至川の合流地点付近に位置する。建物はRC造4階建て、平面形状はコの字型となっている（写真4.4-1）。北東側の地表に1台の地震計（Atom）、建物の南西側の1階機械室と4階議場裏側に2台の強震計（CV374）を設置した（図4.4-2、写真4.4-2～写真4.4-4）。地表の地震計による観測期間は令和6年（2024年）4月10日から4月27日まで、建物内の強震計による観測期間は令和6年（2024年）4月10日から5月8日までである。なお、建物内の強震計は平成19年（2007年）能登半島地震の余震観測の際に設置した場所^{4.4-1)}と同じ箇所に設置した。



平面図：輪島市ホームページ 4.4-2)

(i) 地表・1階機械室

(ii) 4階議場

図4.4-2 WJMS（輪島市役所）強震計・地震計設置位置



写真4.4-1 WJMS（輪島市役所）概観



写真4.4-2 地震計設置状況
(WJMS1：北東側地表、Atom No.9_262)



写真4.4-3 強震計設置状況
(WJMS2：南西側1階、CV374_144)



写真4.4-4 強震計設置状況
(WJMS3：南西側4階、CV374_142)

4.4.2 WJMC (WJMC1、WJMC2、WJMC3、WJMC4、WJMC5 : 地表 - 建物)

WJMCは輪島市市街地の西側に位置し、地表には気象庁輪島が設置されている。建物はRC造4階建て(写真4.4-5)、平面形状を図4.4-3及び図4.4-4に示す。南側の地表、建物の南東側の1階階段室と屋上階段室、北西側の1階エントランス、南西側の2階窓口入口横に5台の強震計(Sonas)を設置した(図4.4-3、図4.4-4、写真4.4-6~写真4.4-10)。観測期間は令和6年(2024年)4月10日から5月8日までである。



写真 4.4-5 WJMC 概観

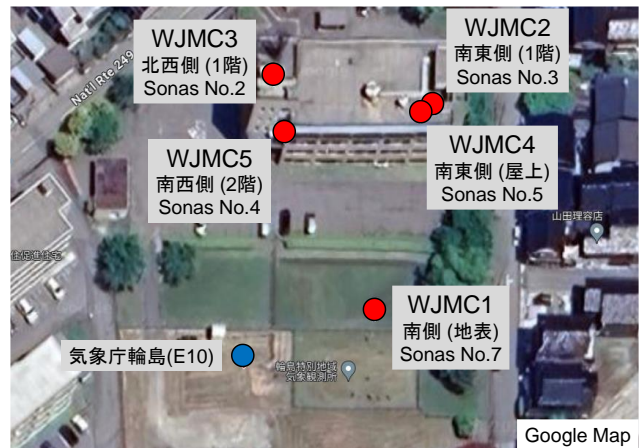


図 4.4-3 WJMC 強震計設置位置

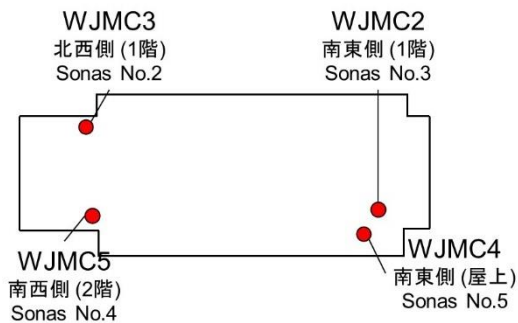


図 4.4-4 WJMC 建物平面形状略図



写真 4.4-6 強震計設置状況
(WJMC1 : 南側地表、Sonas No.7)



写真 4.4-7 強震計設置状況
(WJMC2 : 南東側 1階、Sonas No.3)



写真 4.4-8 強震計設置状況
(WJMC3 : 北西側 1階、Sonas No.2)



写真 4. 4-9 強震計設置状況
(WJMC4 : 南東側屋上、Sonas No.5)



写真 4. 4-10 強震計設置状況
(WJMC5 : 南西側 2 階、Sonas No.4)

4. 4. 3 WJMF (WJMF1、WJMF2、WJMF3、WJMF4 : 地表 - 建物)

WJMF は輪島市市街地の中心に位置する。建物は RC 造 3 階建て (写真 4.4-11)、平面形状を図 4.4-5 及び図 4.4-6 に示す。北側の地表に 1 台の地震計 (Atom)、建物の北側の 1 階診察室と 3 階階段室、南側の 1 階会議室に 3 台の強震計 (CV374) を設置した (図 4.4-5、図 4.4-6、写真 4.4-12~写真 4.4-15)。地表の地震計による観測期間は令和 6 年 (2024 年) 4 月 10 日から 4 月 26 日まで、建物内の強震計による観測期間は令和 6 年 (2024 年) 4 月 10 日から 5 月 8 日までである。



写真 4. 4-11 WJMF 概観



図 4. 4-5 WJMF 強震計・地震計設置位置

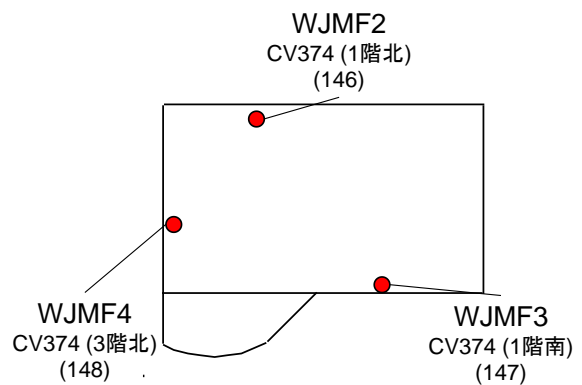


図 4. 4-6 WJMF 建物平面形状略図



写真 4.4-12 地震計設置状況
(WJMF1 : 北側地表、Atom No.8_261)



写真 4.4-13 強震計設置状況
(WJMF2 : 北側1階、CV374_146)



写真 4.4-14 強震計設置状況
(WJMF3 : 南側1階、CV374_147)



写真 4.4-15 強震計設置状況
(WJMF4 : 北側3階、CV374_148)

4.4.4 WJMM (地表)

WJMM は、輪島市市街地北側の輪島港に位置する施設である。敷地西側にある観光交流施設の駐車場の守衛小屋 (施設東側) に1台の強震計 (CV374) を設置した (図 4.4-7、写真 4.4-16)。観測期間は令和6年 (2024年) 4月10日から5月8日までである。



図 4.4-7 WJMM 観光交流施設
強震計設置位置



写真 4.4-16 強震計設置状況
(WJMM、CV374_143)

4.4.5 WJMG（地表）

WJMG は輪島市市街地の中心に位置する。本震時に倒壊した建物の北側（3階建て建物の1階駐車場脇）の地盤上に1台の地震計（Atom）を設置した（図4.4-8、写真4.4-17）。観測期間は令和6年（2024年）4月10日から4月26日までである。



図 4.4-8 WJMG 地震計設置位置



写真 4.4-17 地震計設置状況
(WJMG、Atom No.7_164)

4.4.6 WJMZ（地表）

WJMZ は輪島市市街地の東側、本震を観測した防災科研の K-NET 輪島観測点（ISK003）から南南西約 140m に位置する。建物北側の地盤上に1台の地震計（Atom）を設置した（図4.4-9、写真4.4-18）。観測期間は令和6年（2024年）4月10日から4月26日までである。



図 4.4-9 WJMZ 地震計設置位置



写真 4.4-18 地震計設置状況
(WJMZ、Atom No.6_162)

4.4.7 WJMK（WJMK1、WJMK2、WJMK3：地表）

WJMK は輪島市市街地の中心に位置する。敷地内北西側にある屋外プール附属建物内に1台の強震計（CV374）を設置し、敷地南東側および南西側の地盤上に地震計（Atom）をそれぞれ1台設置した（図4.4-10、写真4.4-19～写真4.4-21）。強震計による観測期間は令和6年（2024年）4月10日から5月8日まで、WJMK2の観測期間は令和6年（2024年）4月10日から4月27日、WJMK3の観測期間は令和6年（2024年）4月11日から4月28日までである。

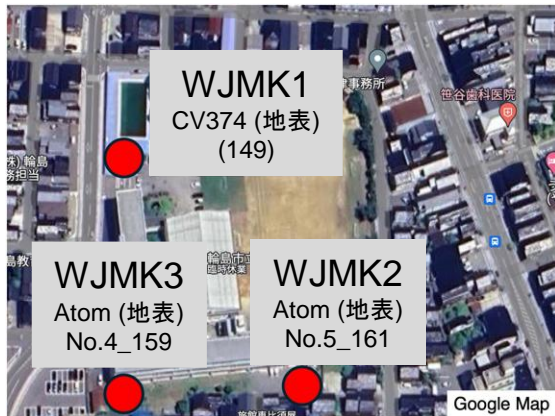


図 4. 4-10 WJMK
強震計・地震計設置位置



写真 4. 4-19 強震計設置状況
(WJMK1 : 北西側、CV374_149)



写真 4. 4-20 地震計設置状況
(WJMK2 : 南東側、Atom No.5_162)



写真 4. 4-21 地震計設置状況
(WJMK3 : 南西側、Atom No.4_159)

参考文献

- 4.4-1) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人土木研究所, 独立行政法人建築研究所:
平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震被害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料 No.438, 土
木研究所資料 No.4087、建築研究資料 No.111, 2008 年 2 月
- 4.4-2) 輪島市: 輪島市本庁舎等整備審議会資料, 2024 年 5 月閲覧
(<https://www.city.wajima.ishikawa.jp/docs/2019061200043/>)

4.5 輪島市における余震観測記録と分析結果

4.5.1 輪島市における余震観測記録

令和6年（2024年）4月10日から5月8日において、能登半島で発生した震度1以上の余震を表4.5-1に示す^{4.5-1)}。表4.5-1において最大震度2が計測された地震のうち、5つの地震（灰色網掛分）ではK-NET輪島観測点（ISK003）^{4.5-2)}においても地震記録が得られている。

図4.5-1～図4.5-3にK-NET輪島観測点（ISK003）、気象庁輪島（WJMC）及びWJMS（輪島市役所）の土質図^{4.5-2),4.5-3)}を示す。K-NET輪島観測点（ISK003）^{4.5-2)}は、厚さ10cmの表土より下は岩盤と分類される地層で構成されており、深さ19mまでのせん断波速度は230 m/s～790 m/sまで増大している。気象庁輪島（WJMC）^{4.5-3)}は、深さ24mまでは粘性土と砂質土が互層となっており、そのせん断波速度は60 m/s程度～200 m/s程度まで増大している。また、深さ35mまでは砂礫層が続き、そのせん断波速度は250 m/s程度～350 m/s程度である。さらに、深さ35mに工学的基盤と考えられる砂岩が存在する。WJMS（輪島市役所）^{4.5-3)}は、深さ2～4m程度に砂礫層があり、そのせん断波速度は200 m/sである。また、5m～26mにはシルト質層があり、そのせん断波速度は100 m/s～220 m/sである。27m以降の深さでは砂礫層となり、そのせん断波速度は300 m/s以上である。なお、29m以降の深さについては、WJMS（輪島市役所）の深さ27mが気象庁輪島（WJMC）の深さ28mに対応するものと仮定して、気象庁輪島（WJMC）の30m以降の深さにおける情報を付加している。

図4.5-4～図4.5-8にこれらの5つの地震で観測記録された余震記録の加速度波形、加速度応答スペクトル及び加速度応答スペクトル S_a と変位応答スペクトル S_d の関係（ S_a - S_d 曲線）を示す。加速度応答スペクトルと S_a - S_d 曲線の減衰定数は5%として算定した。

表 4.5-1 能登半島における震度1以上の地震（4月10日から5月8日）^{4.5-1)}

発生日	発生時刻	震央地名	深さ (km)	規模 (M)	最大震度	発生日	発生時刻	震央地名	深さ (km)	規模 (M)	最大震度
2024/4/10	9:03:53	能登半島沖	0	2.8	1	2024/4/24	11:42:14	能登半島沖	10	3.7	2
2024/4/10	11:45:15	石川県能登地方	4	2.6	2	2024/4/25	8:34:32	石川県能登地方	9	2.8	1
2024/4/11	11:51:32	石川県能登地方	5	2.4	1	2024/4/25	18:35:45	石川県能登地方	7	3.1	1
2024/4/11	13:16:16	石川県能登地方	12	3.5	2	2024/4/26	9:28:29	石川県能登地方	12	2.3	1
2024/4/11	16:45:02	石川県能登地方	12	2.9	1	2024/4/26	18:34:00	能登半島沖	3	2.6	3
2024/4/12	20:07:12	石川県能登地方	3	1.7	1	2024/4/27	16:58:47	石川県能登地方	7	3.3	1
2024/4/13	10:58:05	石川県能登地方	0	2.5	1	2024/4/28	14:37:59	石川県能登地方	7	3.3	2
2024/4/13	23:01:31	石川県能登地方	11	2.4	1	2024/4/30	0:08:51	石川県能登地方	13	3	2
2024/4/14	8:32:11	石川県能登地方	11	3.4	2	2024/4/30	10:54:40	能登半島沖	5	3.2	1
2024/4/16	8:59:27	石川県能登地方	2	1.2	1	2024/4/30	16:24:55	石川県能登地方	13	3.1	1
2024/4/18	14:41:46	石川県能登地方	12	3.1	1	2024/4/30	17:06:52	石川県能登地方	10	2.7	1
2024/4/19	20:55:05	石川県能登地方	10	3	1	2024/5/1	2:53:21	石川県能登地方	13	2.6	1
2024/4/19	20:55:52	石川県能登地方	13	2.9	1	2024/5/1	8:28:16	石川県能登地方	6	2.8	1
2024/4/21	6:46:58	石川県能登地方	12	2.4	1	2024/5/1	21:54:00	石川県能登地方	8	3	2
2024/4/21	14:13:16	石川県能登地方	10	2.4	1	2024/5/3	12:32:50	石川県能登地方	11	2.8	1
2024/4/21	15:51:00	能登半島沖	6	2.5	1	2024/5/4	9:41:23	石川県能登地方	8	1.7	1
2024/4/21	16:06:47	石川県能登地方	11	3.3	1	2024/5/6	3:53:21	石川県能登地方	10	3.3	2
2024/4/22	15:38:59	能登半島沖	14	3.3	1	2024/5/8	6:53:44	能登半島沖	8	3.6	1

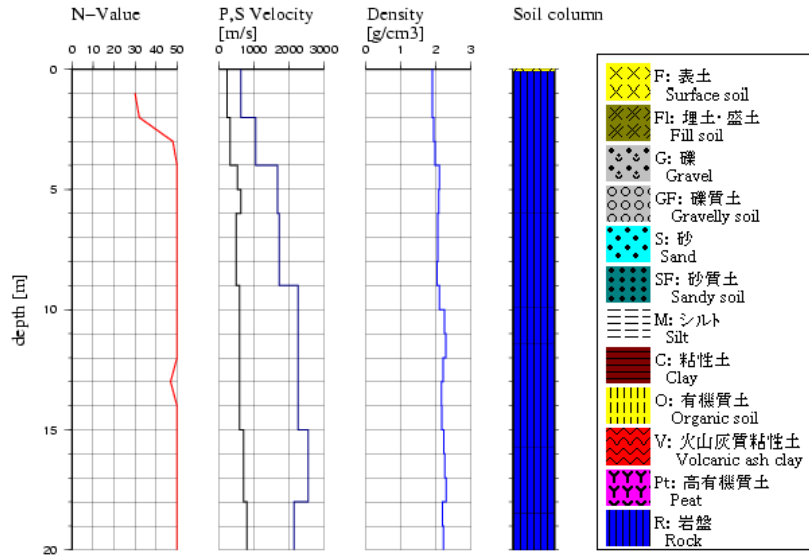
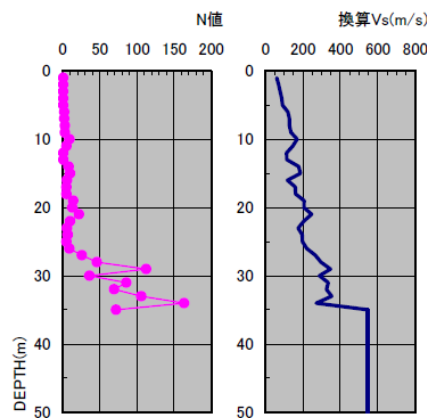
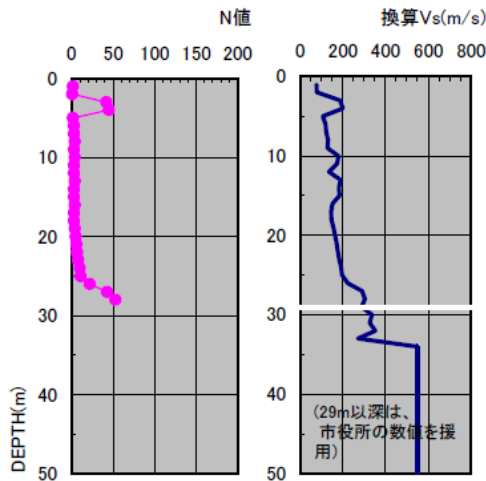


図 4.5-1 K-NET 輪島観測点 (ISK003) の土質図 4.5-2)



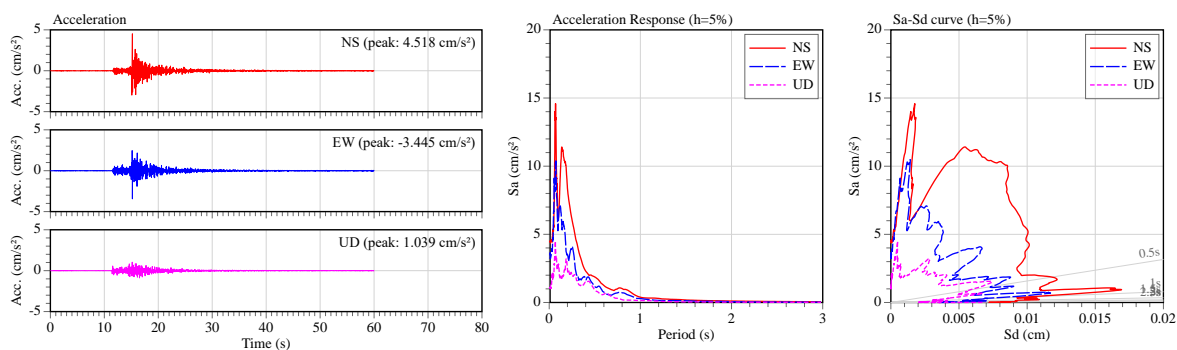
深さ(m)	地質名
0.00 ~ 0.20	盛土
0.20 ~ 0.75	シルト質粘土
0.75 ~ 1.05	砂礫
1.05 ~ 1.35	シルト質粘土
1.35 ~ 3.90	粘土
3.90 ~ 9.00	シルト質砂
9.00 ~ 10.40	中砂
10.40 ~ 11.40	砂質シルト
11.40 ~ 13.90	シルト
13.90 ~ 14.80	シルト質中砂
14.80 ~ 15.70	シルト混り中砂
15.70 ~ 18.80	シルト
18.80 ~ 21.00	中砂
21.00 ~ 21.80	砂礫
21.80 ~ 23.00	礫混り細砂
23.00 ~ 23.50	粘土質シルト
23.50 ~ 24.30	シルト質細砂
24.30 ~ 28.20	砂礫
28.20 ~ 34.70	砂礫
34.70 ~ 35.25	砂岩

図 4.5-2 気象庁輪島 (WJMC) の土質図 4.5-3)

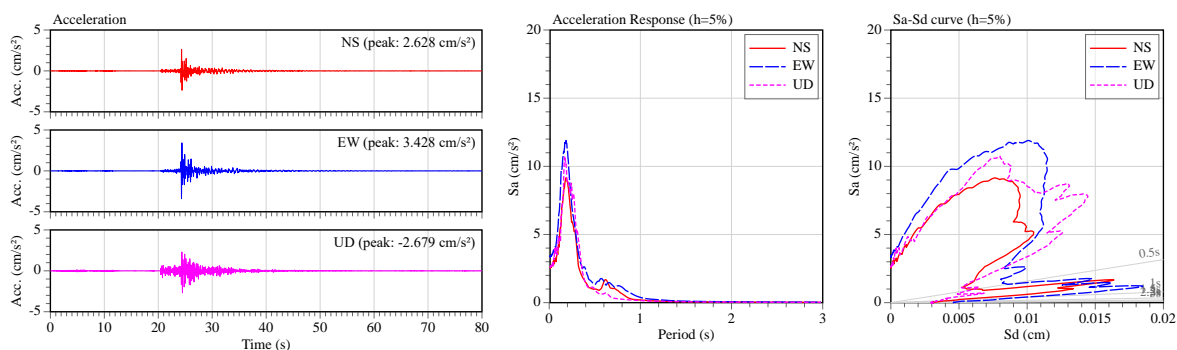


深さ(m)	地質名
0.00 ~ 0.90	表土
0.90 ~ 2.35	シルト質粘土
2.35 ~ 4.44	シルト混り砂礫
4.44 ~ 5.50	シルト
5.50 ~ 13.10	砂質シルト
13.10 ~ 14.90	シルト
14.90 ~ 17.10	砂質シルト
17.10 ~ 18.40	シルト
18.40 ~ 19.20	砂質シルト
19.20 ~ 25.70	粘土質シルト
25.70 ~ 27.85	シルト混り砂礫
27.85 ~ 30.00	砂礫

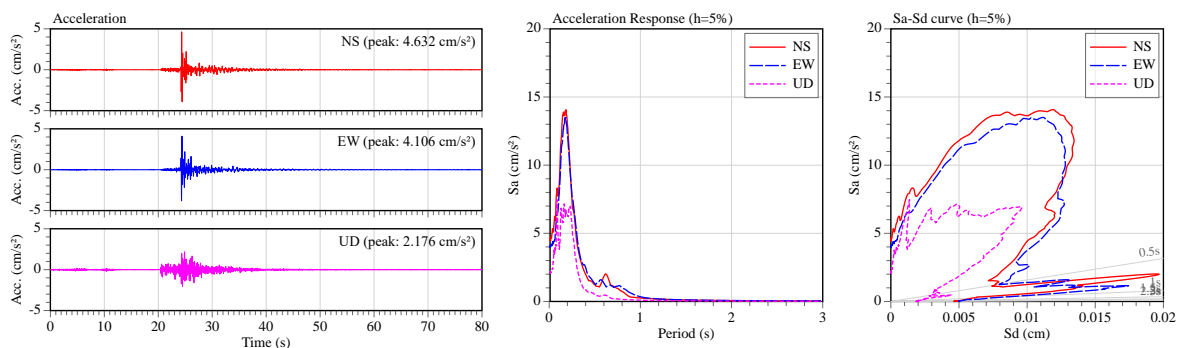
図 4.5-3 輪島市役所の土質図 4.5-3)



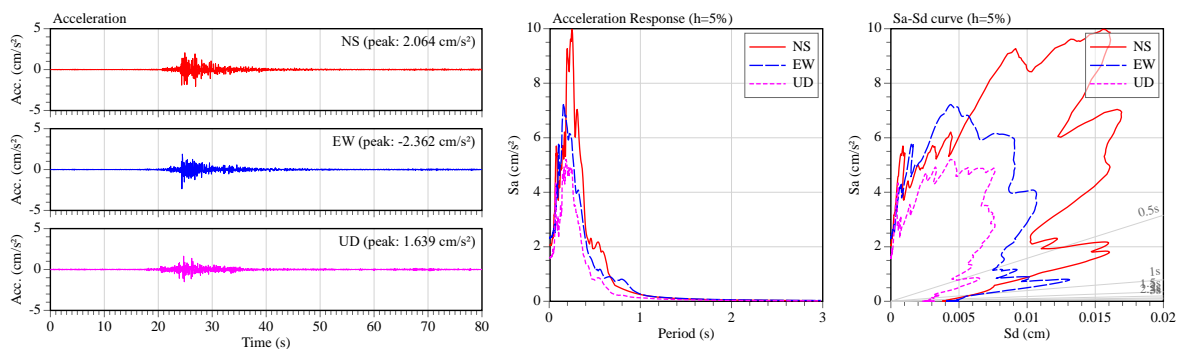
(i) K-NET 輪島 (ISK003)



(ii) WJMZ

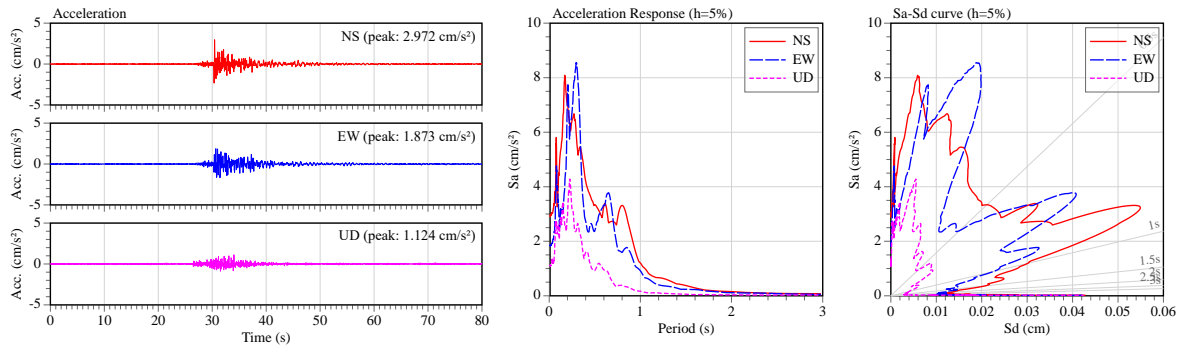


(iii) WJMK_南西側 (WJMK3)

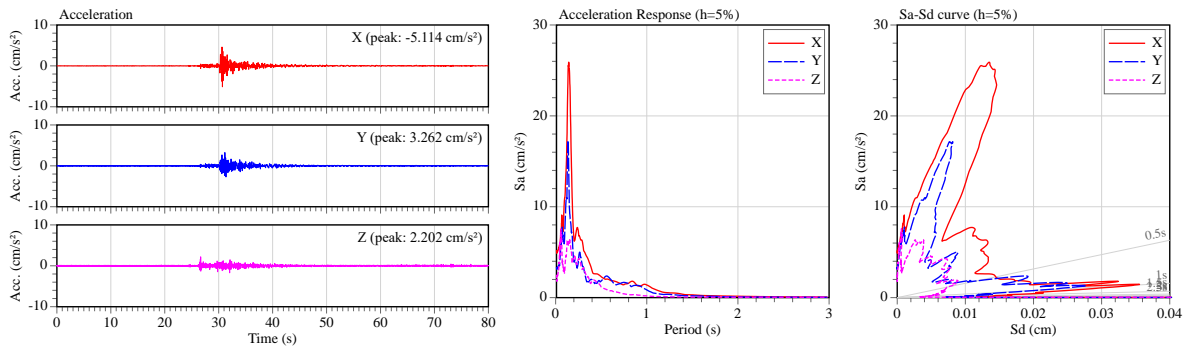


(iv) WJMK_南東側 (WJMK2)

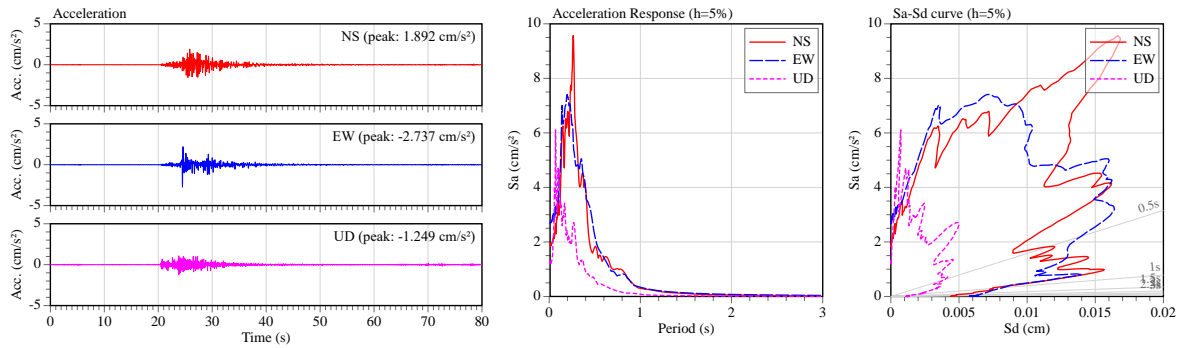
図 4.5-4 令和 6 年 (2024 年) 4 月 11 日 13 時 16 分の地震記録



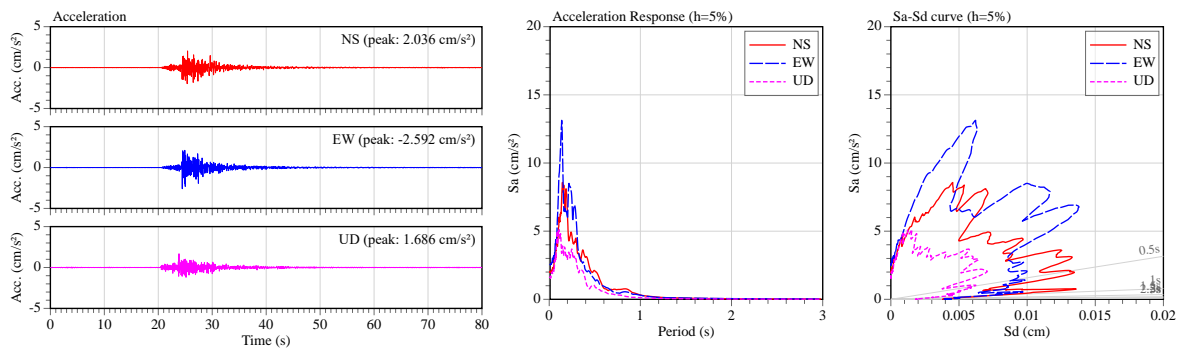
(v) WJMK_北西側 (WJMK1)



(vi) WJMM

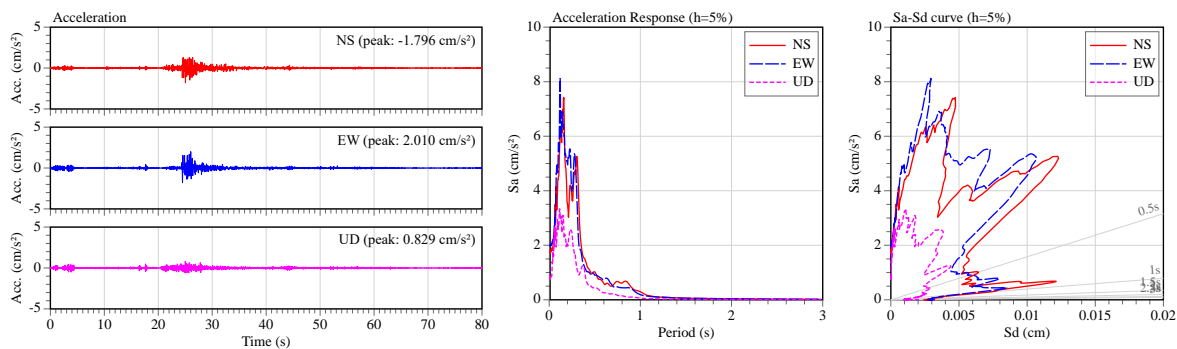


(vii) WJMG

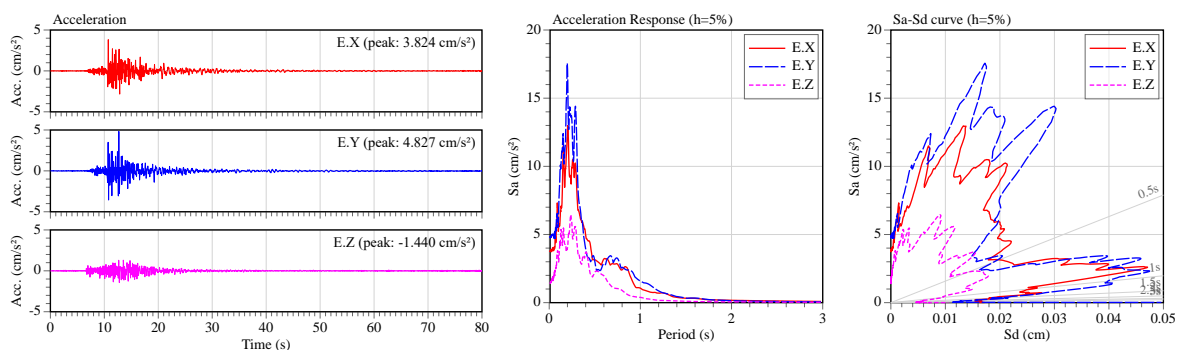


(viii) WJMF_地表 (WJMF1)

図 4.5-4 令和 6 年 (2024 年) 4 月 11 日 13 時 16 分の地震記録 (続き)

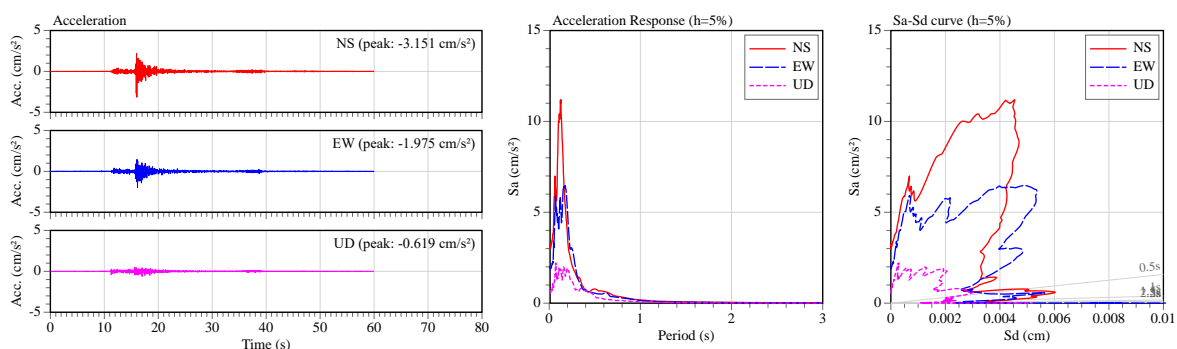


(ix) WJMS (輪島市役所)_地表 (WJMS1)

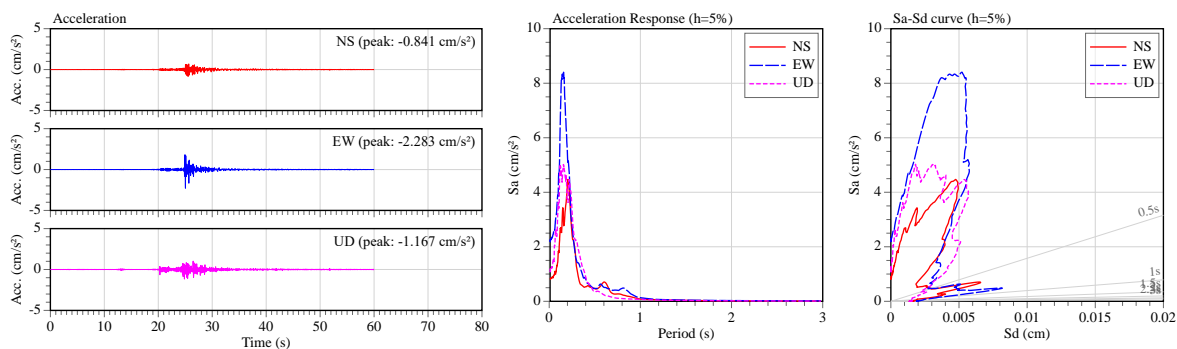


(x) WJMC_地表 (WJMC1)

図 4.5-4 令和 6 年 (2024 年) 4 月 11 日 13 時 16 分の地震記録 (続き)

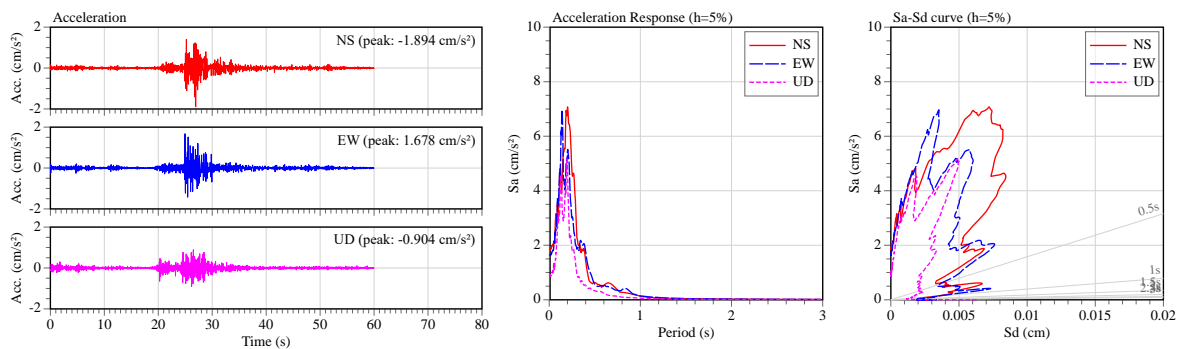


(i) K-NET 輪島 (ISK003)

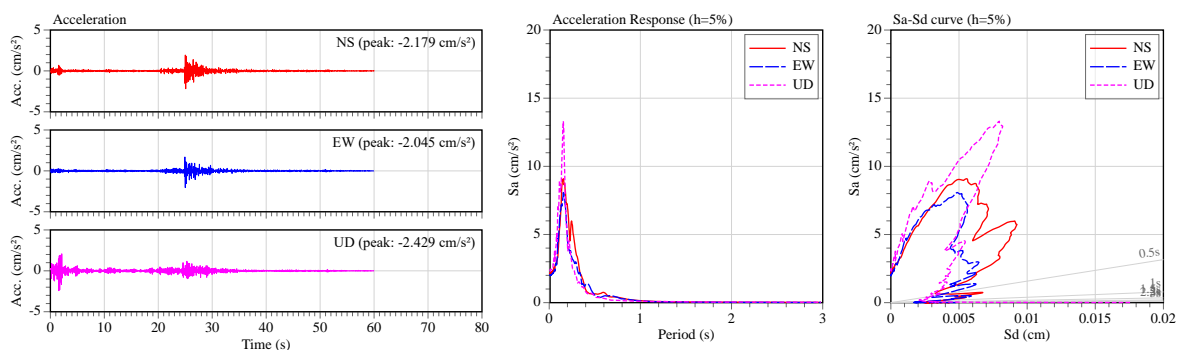


(ii) WJMZ

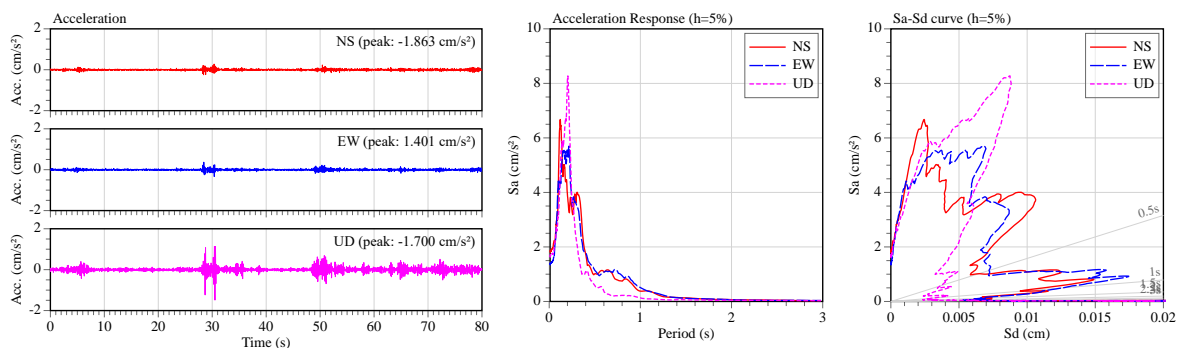
図 4.5-5 令和 6 年 (2024 年) 4 月 24 日 11 時 42 分の地震記録



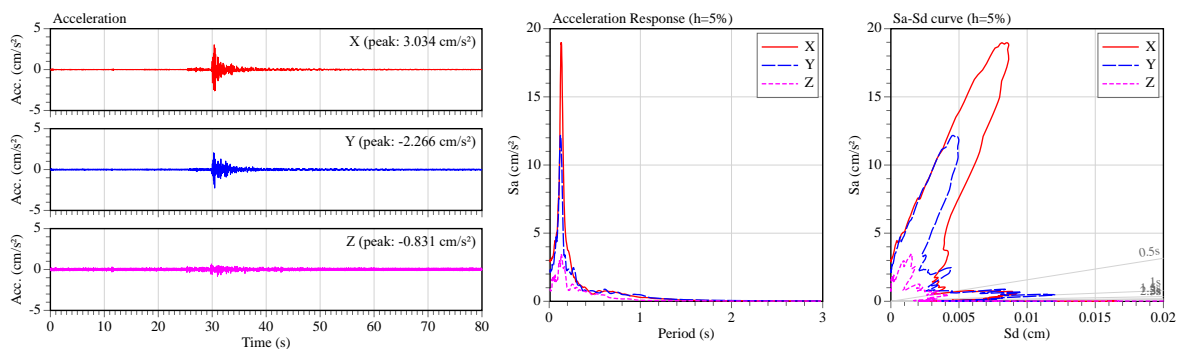
(iii) WJMK_南西側 (WJMK3)



(iv) WJMK_南東側 (WJMK2)

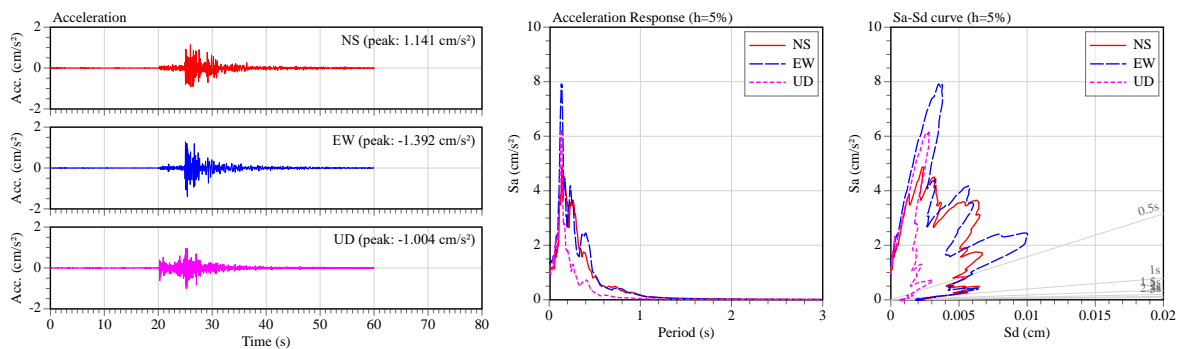


(v) WJMK_北西側 (WJMK1)

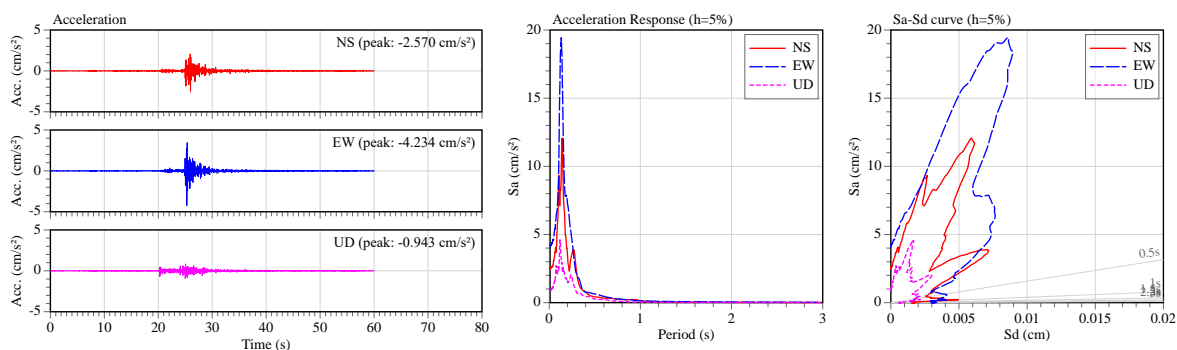


(vi) WJMM

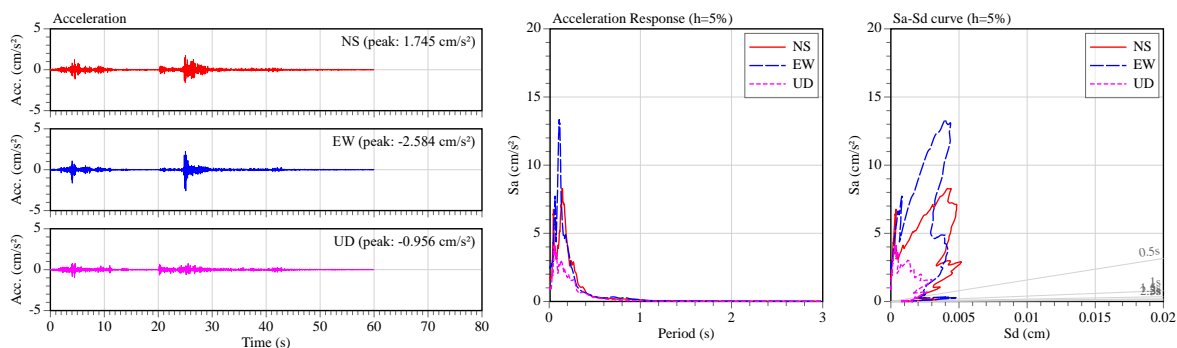
図 4.5-5 令和 6 年 (2024 年) 4 月 24 日 11 時 42 分の地震記録 (続き)



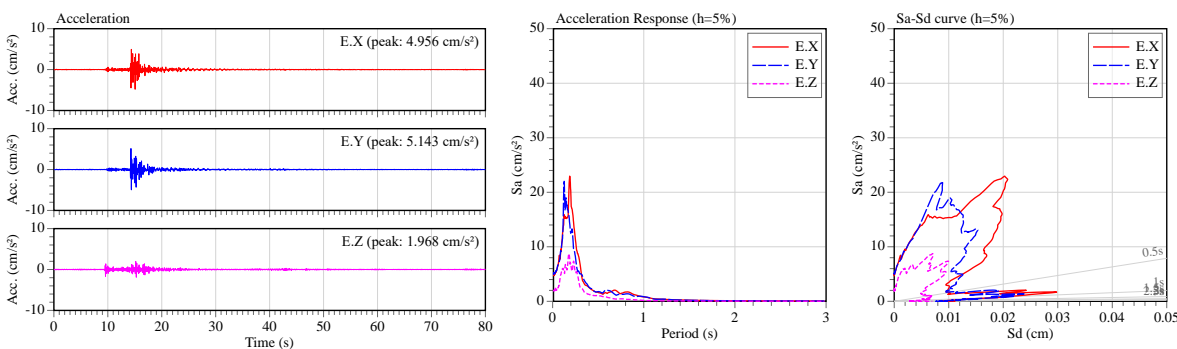
(vii) WJMG



(viii) WJMF_地表 (WJMF1)

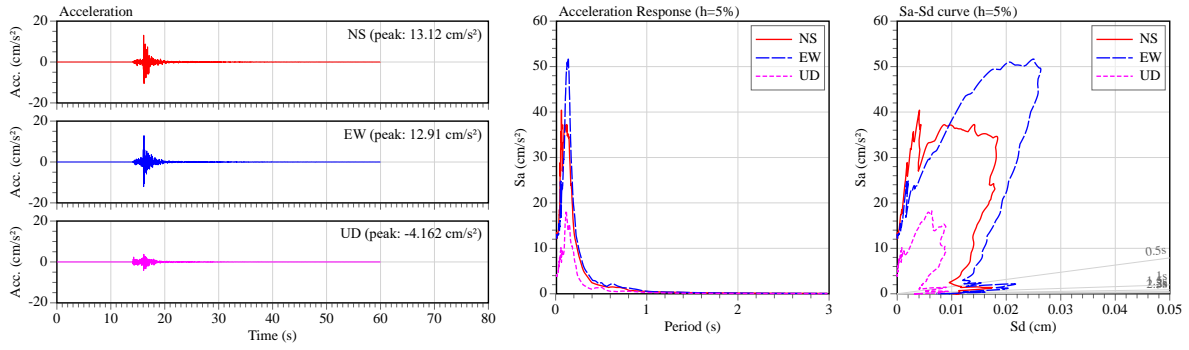


(ix) WJMS (輪島市役所)_地表 (WJMS1)

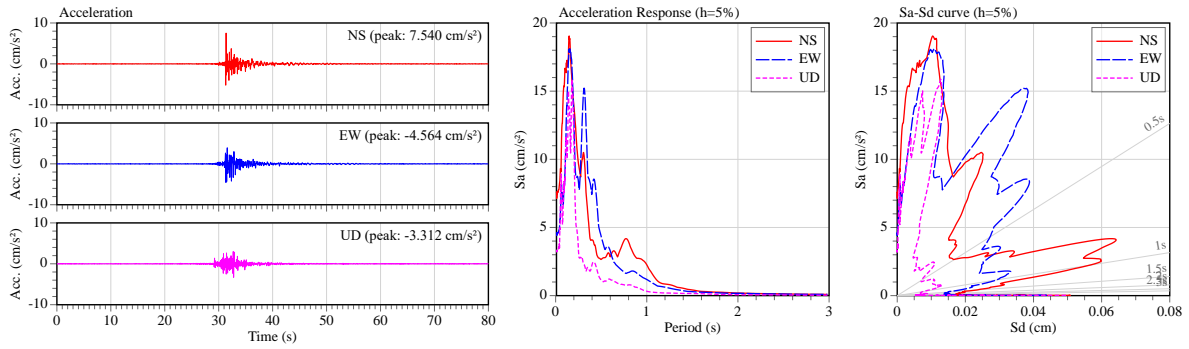


(x) WJMC_地表 (WJMC1)

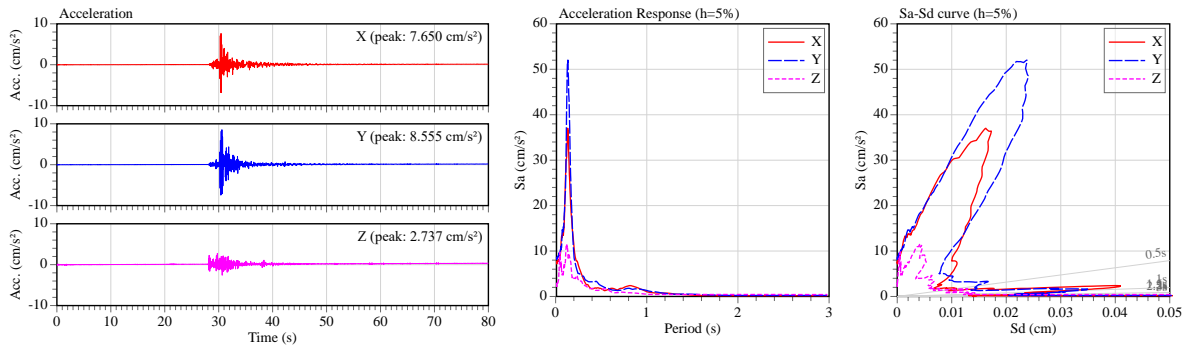
図 4.5-5 令和 6 年 (2024 年) 4 月 24 日 11 時 42 分の地震記録 (続き)



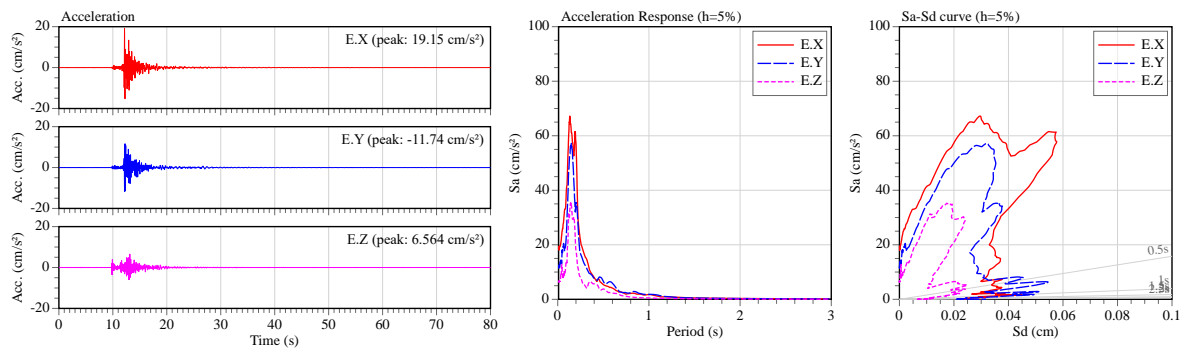
(i) K-NET 輪島 (ISK003)



(ii) WJMK_北西側 (WJMK1)

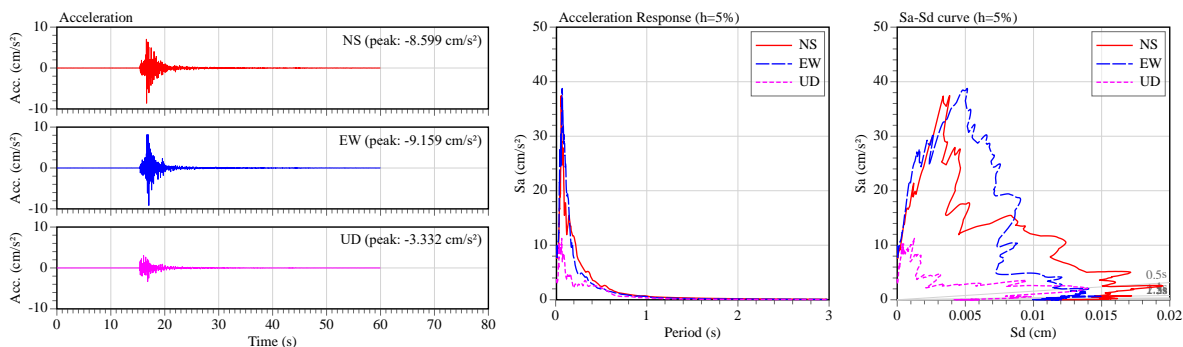


(iii) WJMM

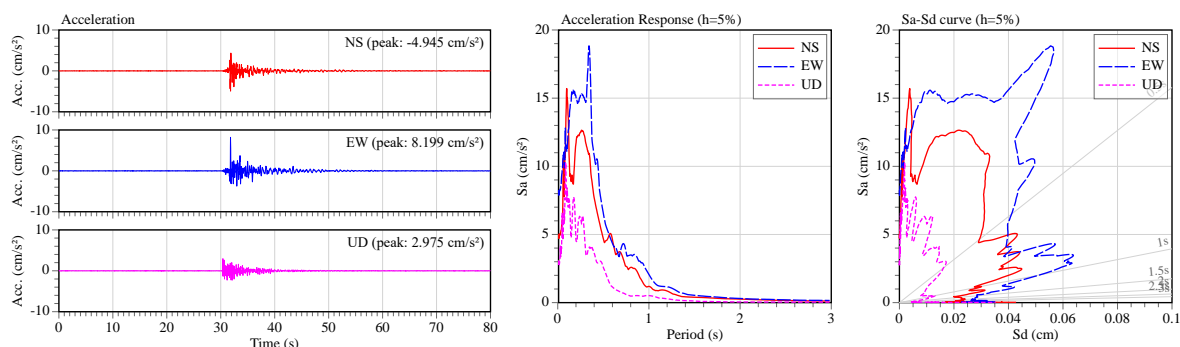


(iv) WJMC_地表 (WJMC1)

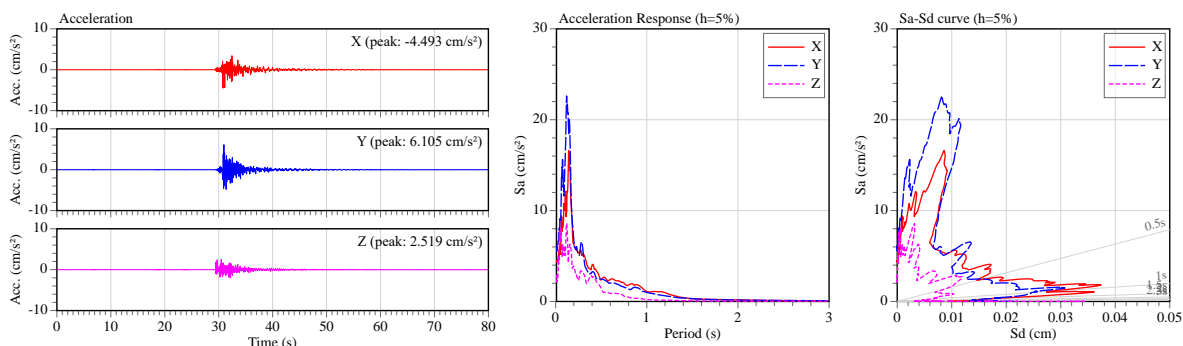
図 4.5-6 令和 6 年 (2024 年) 4 月 28 日 14 時 37 分の地震記録



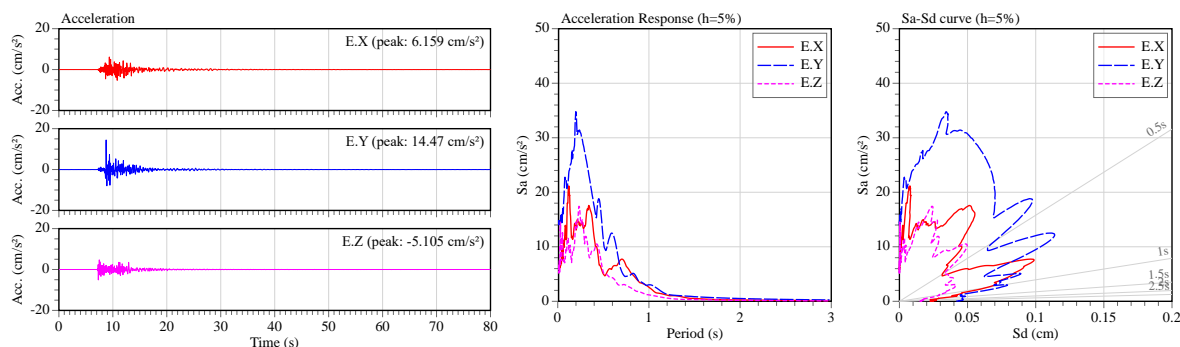
(i) K-NET 輪島 (ISK003)



(ii) WJMK_北西側 (WJMK1)

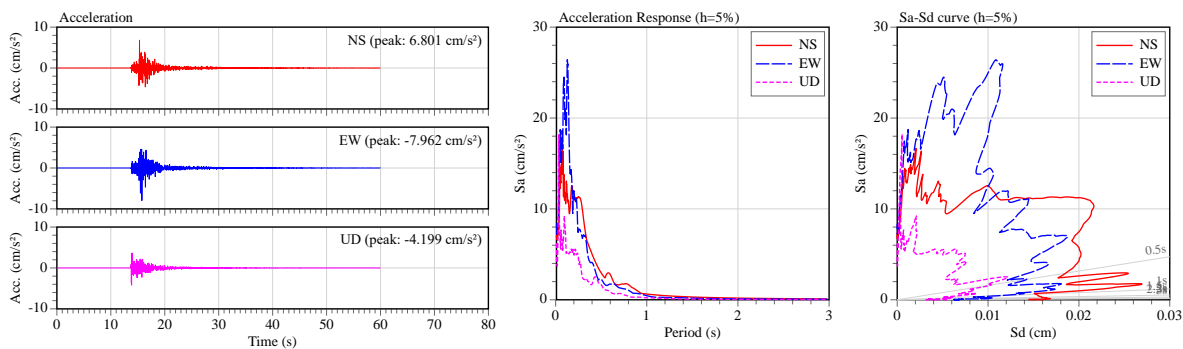


(iii) WJMM

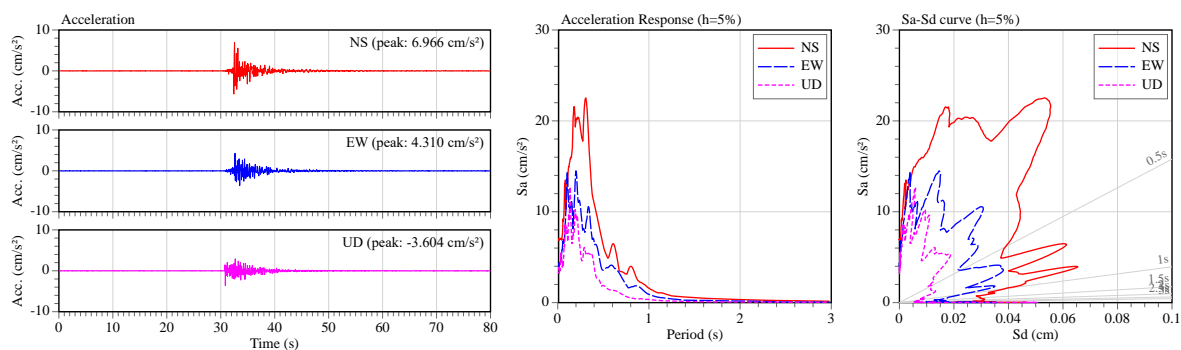


(iv) WJMC_地表 (WJMC1)

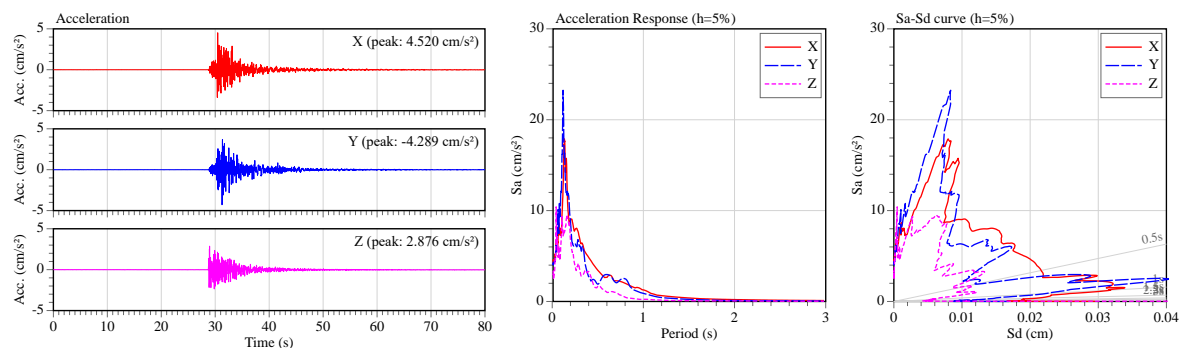
図 4.5-7 令和 6 年 (2024 年) 5 月 1 日 21 時 54 分の地震記録



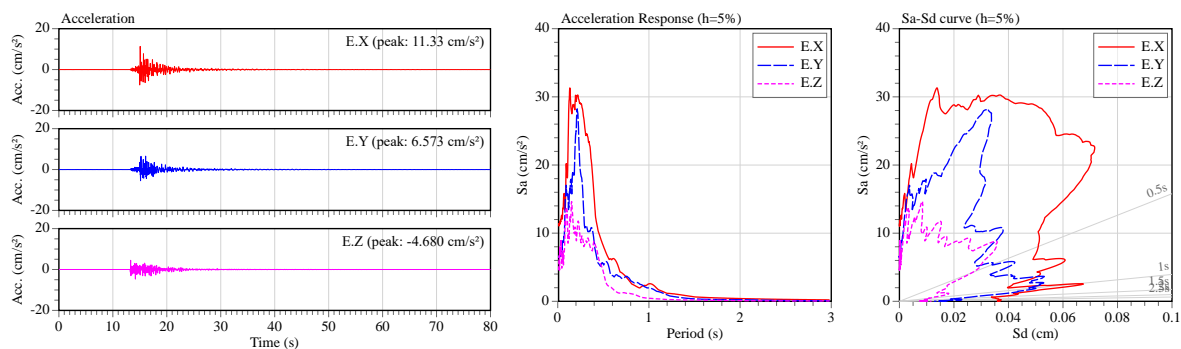
(i) K-NET 輪島 (ISK003)



(ii) WJMK_北西側 (WJMK1)



(iii) WJMM



(iv) WJMC_地表 (WJMC1)

図 4.5-8 令和 6 年 (2024 年) 5 月 6 日 3 時 53 分の地震記録

4.5.2 地表の余震観測記録の分析結果

(1) 最大振幅および計測震度相当値

表 4.5-1 に示す余震のうち、K-NET 輪島観測点 (ISK003) において観測波形記録が公開されている 5 つの地震 (灰色網掛分) を対象に、地表最大加速度 (PGA : 水平動 2 成分合成)、地表最大速度 (PGV : 水平動 2 成分合成)、および計測震度相当値を求めた (図 4.5-9~図 4.5-13)。対象エリアの中央部に位置する観測点 (WJMC、WJMF、WJMG) では、PGA が ISK003 のものと同程度か僅かに下回る値であった。一方、PGV に着目すると、多くの場合、余震観測点の値が ISK003 のものを上回ることが確認された。計測震度相当値においても、余震観測点の値は ISK003 の値と同等かそれ以上となり、観測点 WJMC での値が常に最大であった。

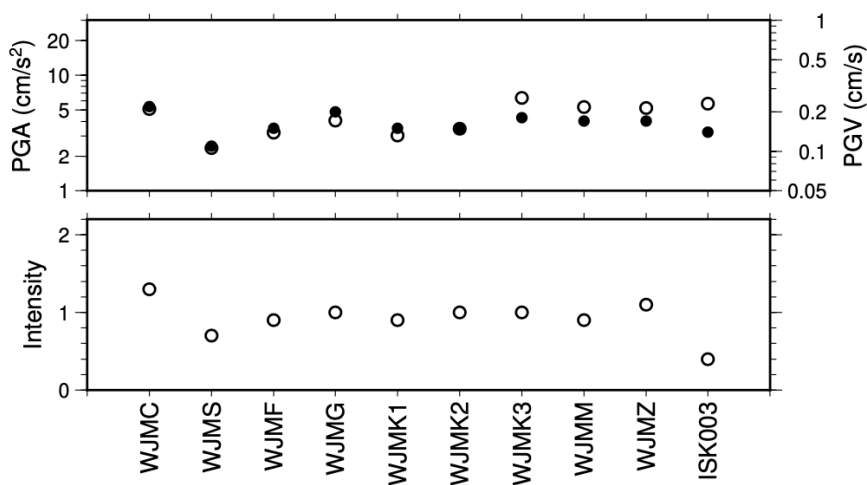


図 4.5-9 令和 6 年 (2024 年) 4 月 11 日 13 時 16 分の地震記録の
PGA(○)、PGV(●)および計測震度相当値

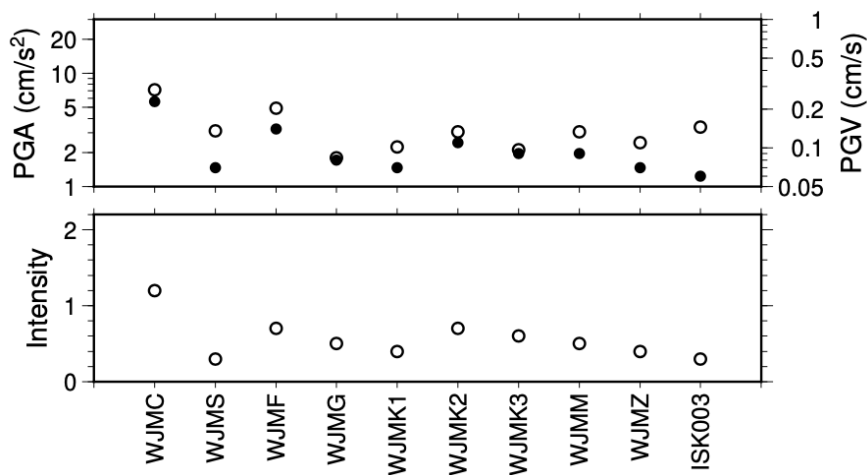


図 4.5-10 令和 6 年 (2024 年) 4 月 24 日 11 時 42 分の地震記録の
PGA(○)、PGV(●)および計測震度相当値

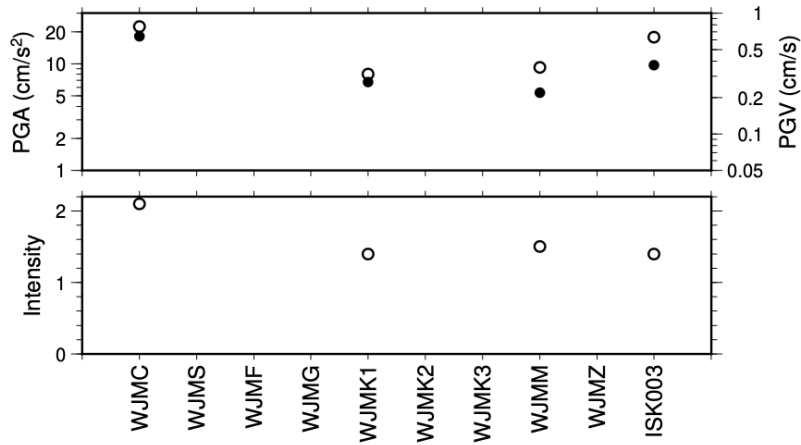


図 4.5-11 令和 6 年（2024 年）4 月 28 日 14 時 37 分の地震記録の
PGA(○)、PGV(●)および計測震度相当値

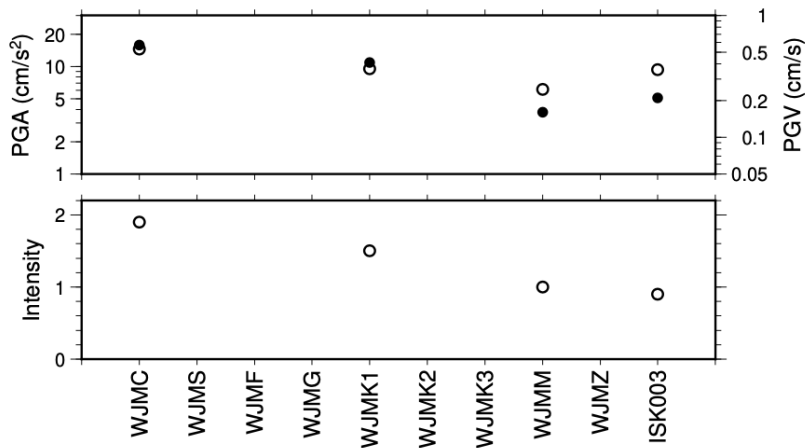


図 4.5-12 令和 6 年（2024 年）5 月 1 日 21 時 54 分の地震記録の
PGA(○)、PGV(●)および計測震度相当値

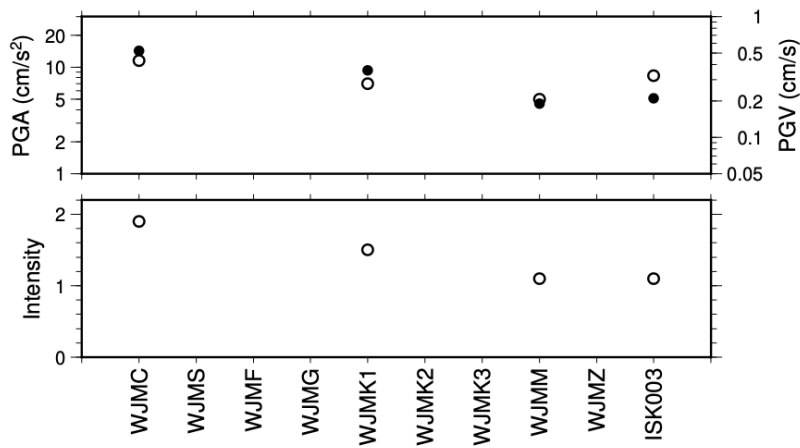


図 4.5-13 令和 6 年（2024 年）5 月 6 日 3 時 53 分の地震記録の
PGA(○)、PGV(●)および計測震度相当値

(2) 地盤の卓越周波数

図 4.5-14 および図 4.5-15 には、上記 5 地震に対し、観測点 ISK003 に対する各余震観測点（地表のみ）の S 波部分（S 波到達から 20.48 秒間）のフーリエ振幅スペクトルの比（水平動、上下動）を示す。全ての余震観測点において、水平動成分では 1Hz 前後の地震動が卓越している。5Hz 以上の地震動は観測点 ISK003 のものが上回っており、観測点 ISK003 周辺の地盤が他の観測点と比べて硬質であることが示唆される。上下動成分では、余震観測点の振幅スペクトルが対象周波数帯域（0.2～20Hz）において ISK003 のものと同等あるいは上回る結果となっており、対象エリアでは上下動成分においても増幅が見られることを示唆している。

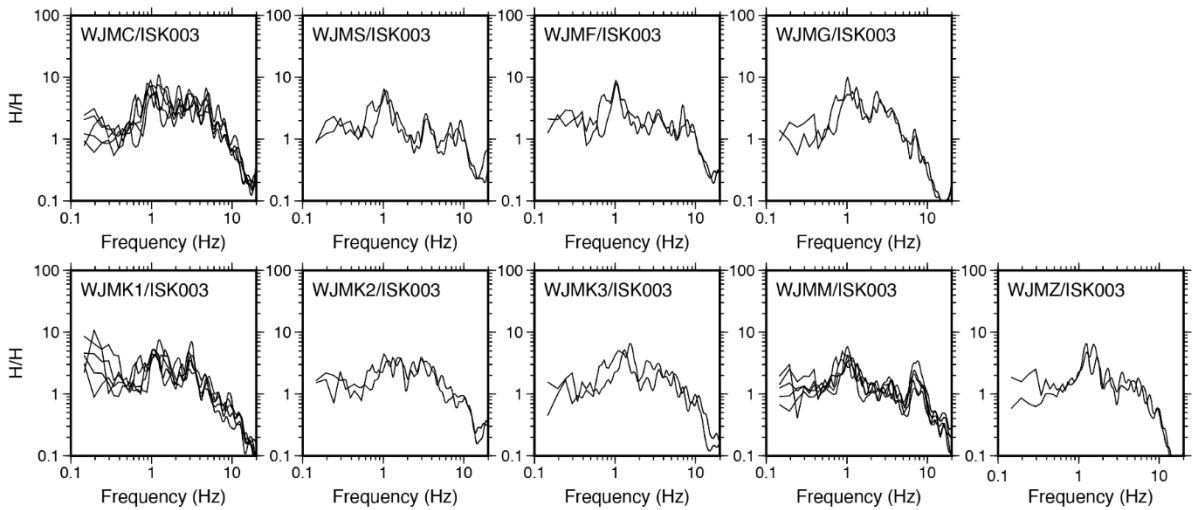


図 4.5-14 K-NET 輪島観測点に対する各余震観測点の S 波スペクトル比（水平動成分）

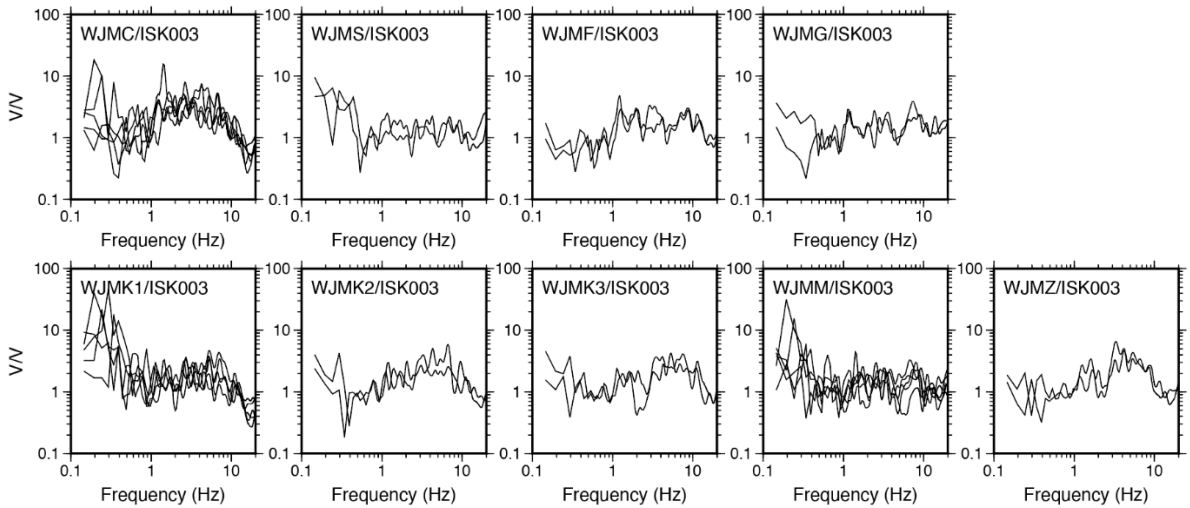


図 4.5-15 K-NET 輪島観測点に対する各余震観測点の S 波スペクトル比（上下動成分）

(3) 加速度応答スペクトルと S_a-S_d 曲線

図 4.5-16 に 2024 年 1 月 1 日 16 時 10 分の令和 6 年能登半島地震における気象庁輪島と K-NET 輪島の比較を加速度応答スペクトルと S_a-S_d 曲線で示す。なお、加速度応答スペクトルと S_a-S_d 曲線の減衰定数は 5% として算定した。また、4.2.2 節と同様に BSLJ を併せて示す。

K-NET 輪島は輪島市内の東側、気象庁輪島は輪島市内の西側に位置する。K-NET 輪島は周期 0.1 秒付近で加速度応答スペクトル S_a が最大値を示すのに対し、気象庁輪島は周期 1.2 秒付近で加速度応答スペクトル S_a が最大値を示す結果となった。

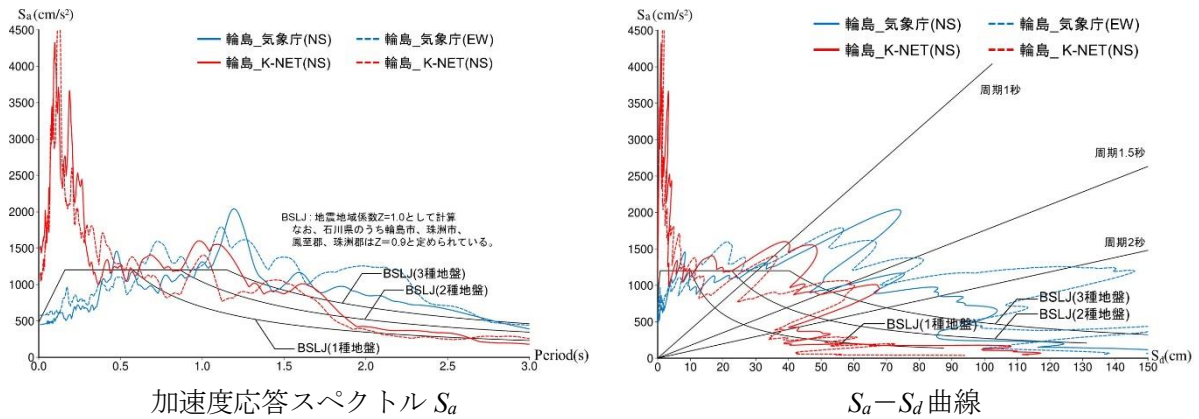


図 4.5-16 令和 6 年 (2024 年) 1 月 1 日 16 時 10 分の令和 6 年能登半島地震の記録 ($h=5\%$)

図 4.5-17～図 4.5-23 に K-NET 輪島と地表の余震記録の比較を加速度応答スペクトルと S_a-S_d 曲線で示す。なお、加速度応答スペクトルと S_a-S_d 曲線の減衰定数は 5% として算定した。また、水平 2 成分のうち S_a-S_d 曲線の形状が大きい方を示す。4.4 節より、気象庁輪島、K-NET 輪島及び余震観測地点の位置は、東から西にかけて K-NET 輪島、WJMZ、WJMK、WJMM、WJMG、WJMF、WJMS (輪島市役所)、WJMC、気象庁輪島となる。なお、観測期間は表 4.4-1 に示す通りである。

WJMM、WJMZ の加速度応答スペクトルは、短周期側で最大応答を示した。WJMC1 の加速度応答スペクトルは、K-NET 輪島に比べて大きい周期で最大値を示した。また、WJMC1 の S_a-S_d 曲線は、2024 年 1 月 1 日 16 時 10 分の令和 6 年能登半島地震における気象庁輪島の S_a-S_d 曲線と似た形状を示した。

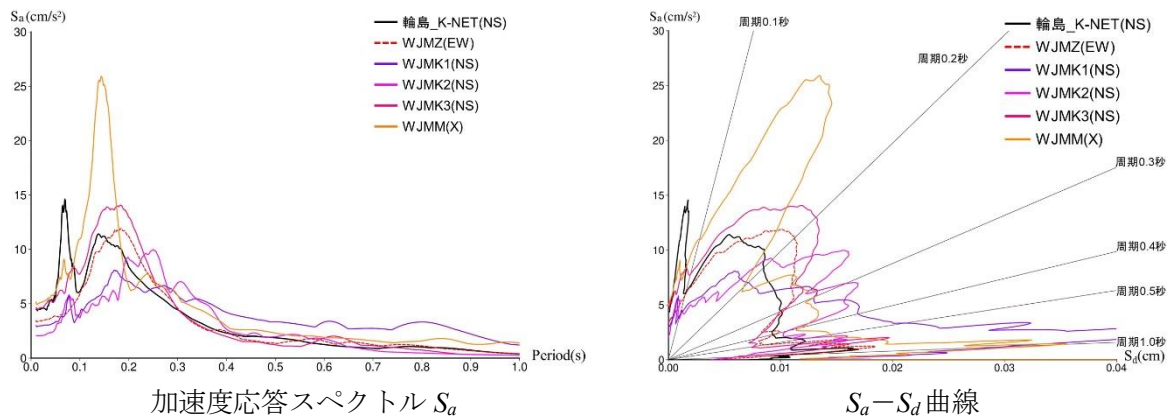


図 4.5-17 令和 6 年 (2024 年) 4 月 11 日 13 時 16 分の地震記録の比較 ($h=5\%$) (輪島市東側)

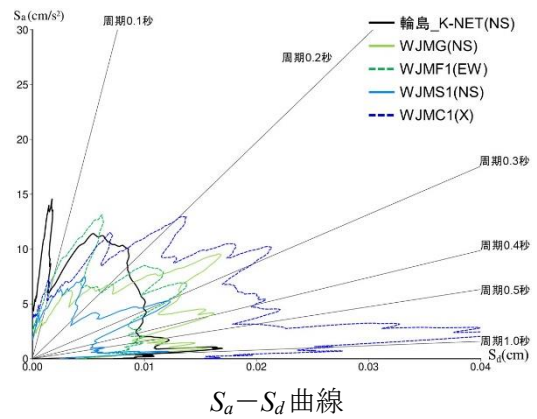
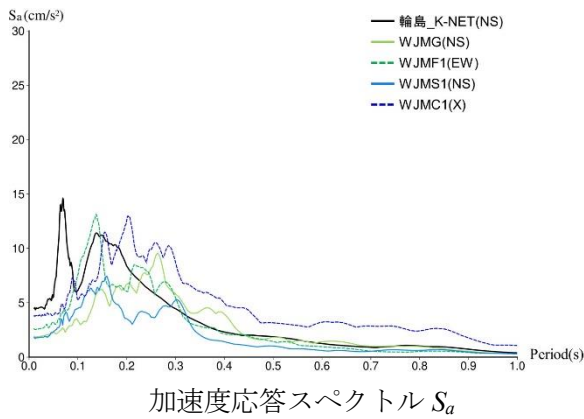


図 4.5-18 令和 6 年 (2024 年) 4 月 11 日 13 時 16 分の地震記録の比較 ($h=5\%$) (輪島市西側)

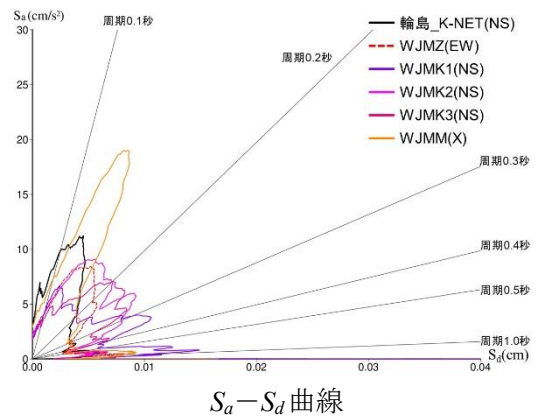
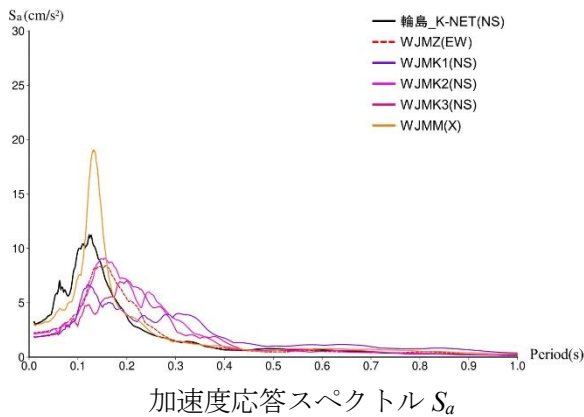


図 4.5-19 令和 6 年 (2024 年) 4 月 24 日 11 時 42 分の地震記録の比較 ($h=5\%$) (輪島市東側)

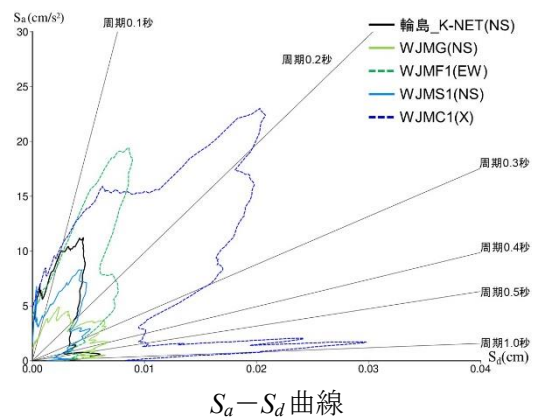
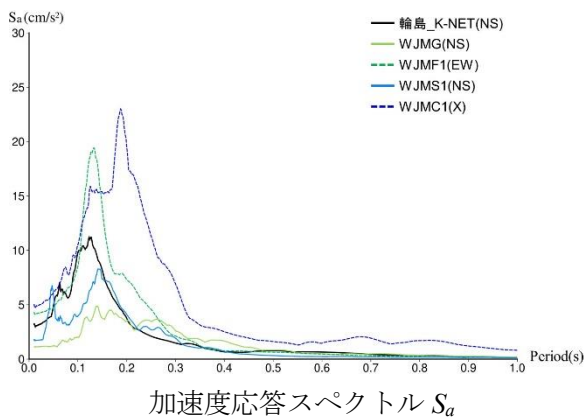


図 4.5-20 令和 6 年 (2024 年) 4 月 24 日 11 時 42 分の地震記録の比較 ($h=5\%$) (輪島市西側)

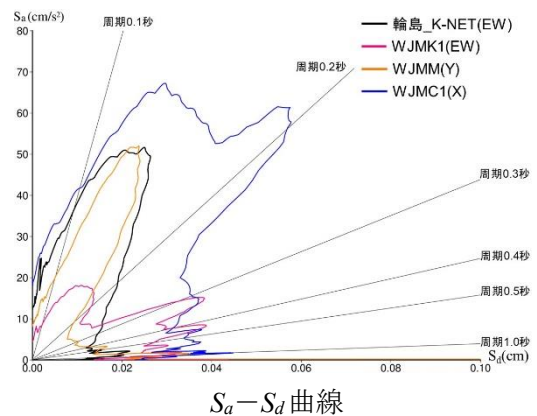
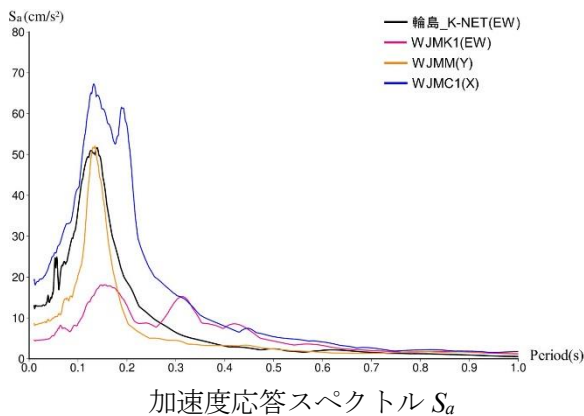


図 4.5-21 令和 6 年 (2024 年) 4 月 28 日 14 時 37 分の地震記録の比較 ($h=5\%$)

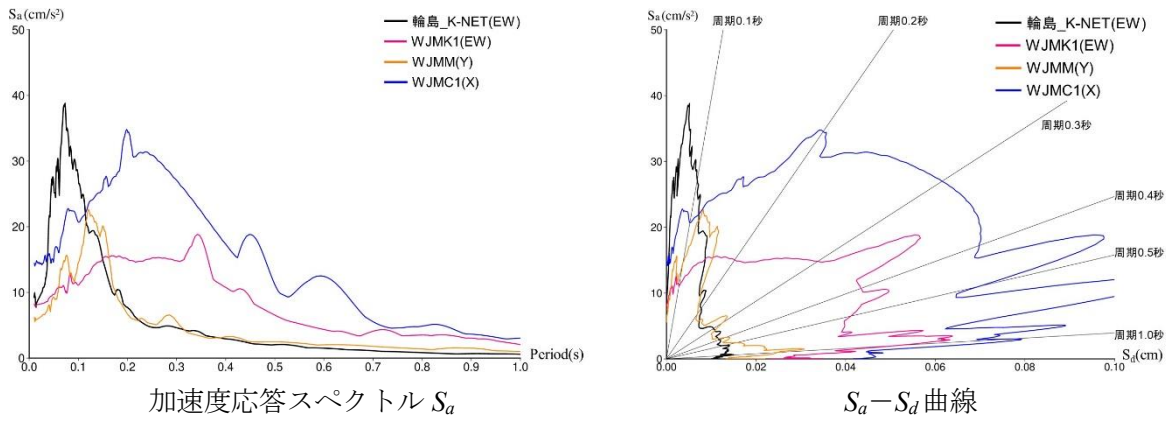


図 4.5-22 令和 6 年 (2024 年) 5 月 1 日 21 時 54 分の地震記録の比較 ($h=5\%$)

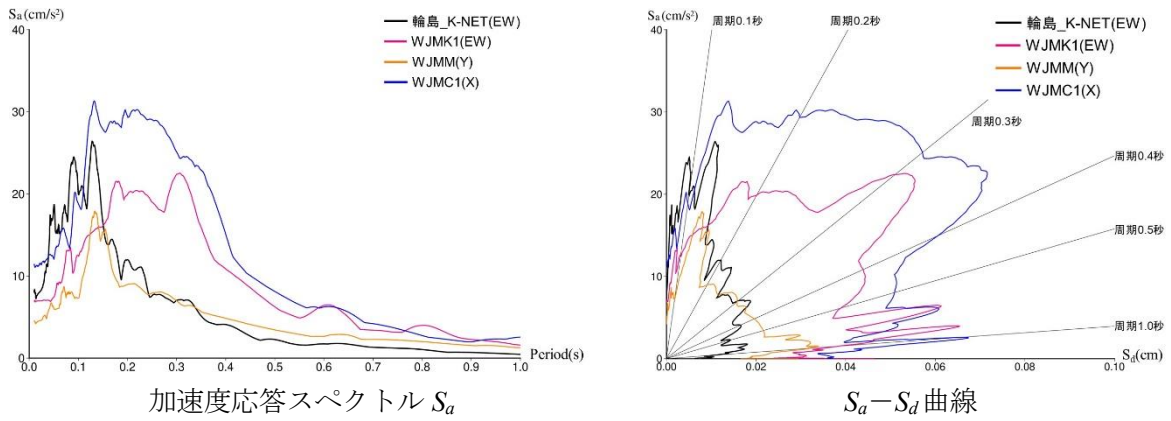
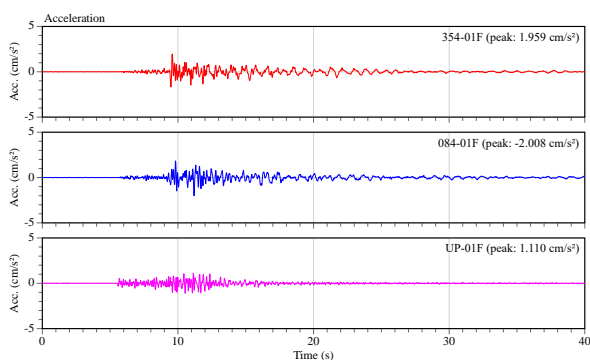


図 4.5-23 令和 6 年 (2024 年) 5 月 6 日 3 時 53 分の地震記録の比較 ($h=5\%$)

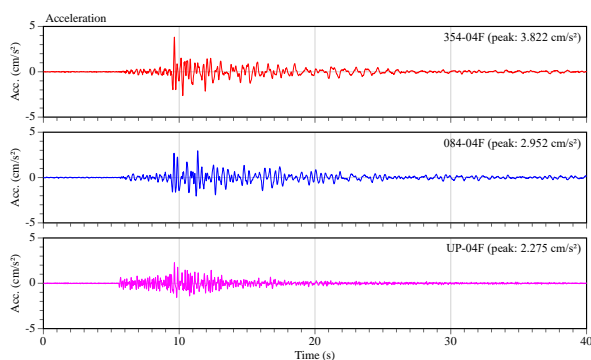
4.5.3 建物の振動特性 (WJMS (輪島市役所)、WJMC、WJMF)

(1) WJMS (輪島市役所)

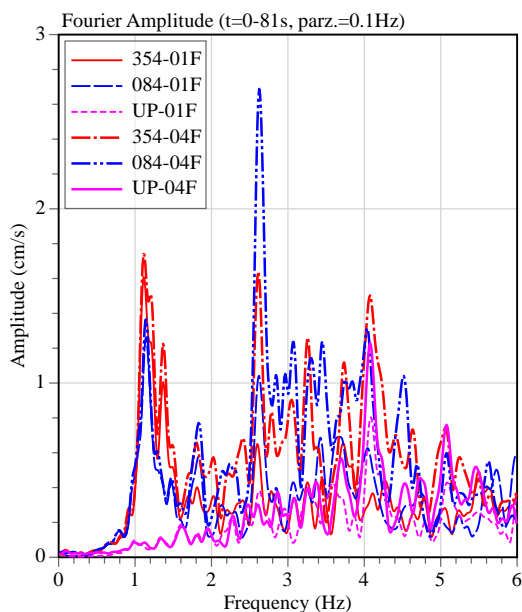
WJMS (輪島市役所) で観測された令和6年(2024年)4月11日13時16分の余震記録の1階と4階の加速度波形とフーリエスペクトル、および水平成分の4階の1階に対するフーリエスペクトル比を図4.5-24に示す。加速度成分のラベル354は北から東回りに 354° の方位を表し、ほぼ北南方向に対応する。同様に084は 84° 、ほぼ東西方向である。1階の記録から算出した計測震度は0.7、1階及び4階の最大加速度は 1 cm/s^2 から 3 cm/s^2 となっている。フーリエスペクトル比に着目すると、上段の振幅比には両水平方向とも3 Hz付近に大きなピークが認められるが下段の位相差に反転は認められず、1次固有振動数のピークではないと考えられる。より高振動数の複数のピークが存在するが位相差の変遷は明瞭ではなく、1次固有振動数を同定するのは困難である。なお、平成19年(2007年)能登半島地震において実施した余震観測(観測期間:平成19年(2007年)3月28日から5月1日)による水平成分の4階の1階に対するフーリエスペクトル比より、1次固有振動数はX方向が2.4Hz、Y方向が2.7Hzであった。また、WJMS(輪島市役所)は2021年に防災庁舎の増築、2022年に既存庁舎の耐震補強(PCアウトフレーム、RC耐震壁増設、耐震スリット)が実施されている。



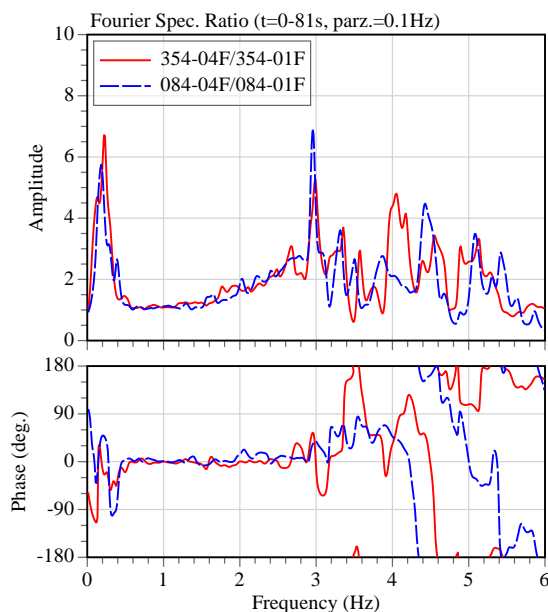
(i) 1階加速度波形 (WJMS2)



(ii) 4階加速度波形 (WJMS3)



(iii) フーリエスペクトル

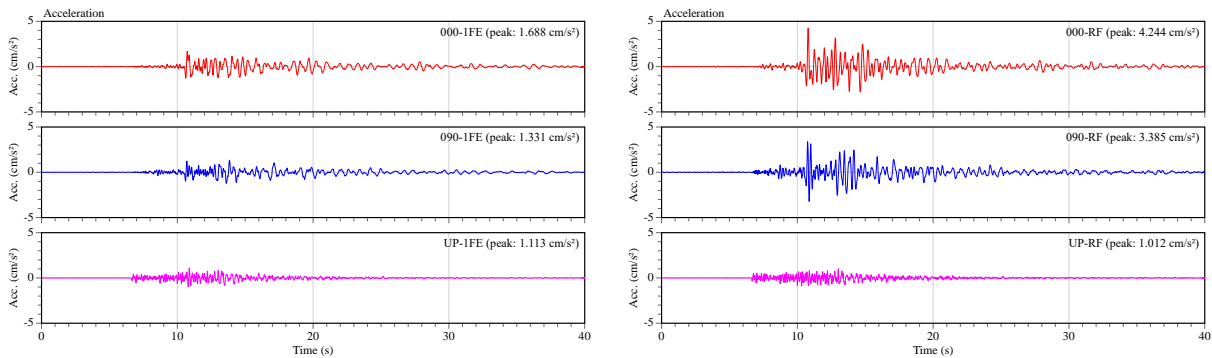


(iv) フーリエスペクトル比
(4階 WJMS3 / 1階 WJMS2)

図4.5-24 WJMS (輪島市役所) (令和6年(2024年)4月11日13時16分)

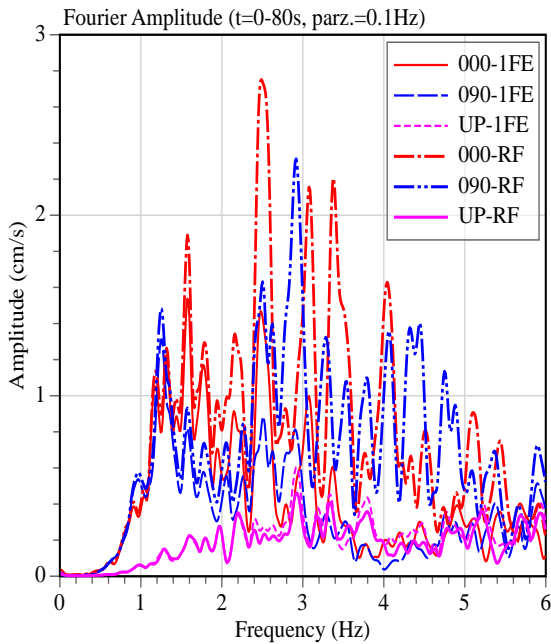
(2) WJMC

WJMC で観測された令和 6 年 (2024 年) 4 月 11 日 13 時 16 分の余震記録の 1 階と屋上の加速度波形とフーリエスペクトル、および水平成分の屋上の 1 階に対するフーリエスペクトル比を図 4.5-25 に示す。加速度成分のラベル 000 は北から東回りに 0° の方位を表し、北南方向に対応する。同様に 090 は 90°、東西方向である。1 階の記録から算出した計測震度は 0.8、1 階及び屋上の最大加速度は数 cm/s² と大きな強震記録ではない。フーリエスペクトル比に着目すると、上段の振幅比には複数のピークが表れているが、下段の位相差は 3.5Hz から 4.5Hz にかけて緩やかに反転しており、いずれの水平方向の 1 次固有振動数も 4Hz 程度と判断できる。

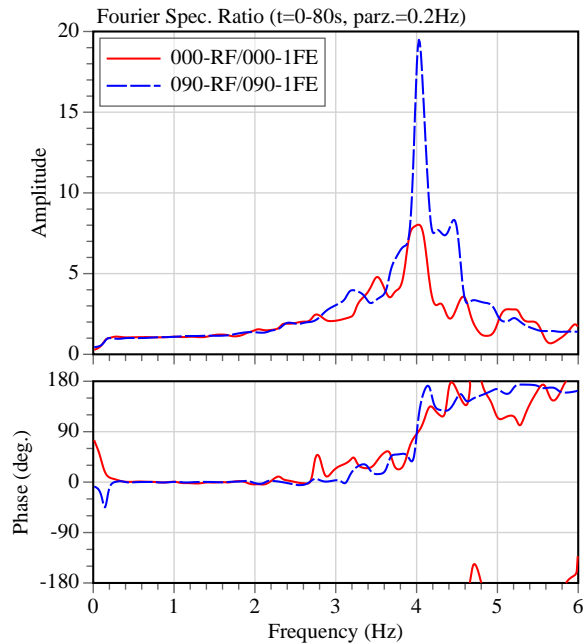


(i) 1 階加速度波形 (WJMC2)

(ii) 屋上加速度波形 (WJMC4)



(iii) フーリエスペクトル



(iv) フーリエスペクトル比

(1 階 (WJMC2)、屋上 (WJMC4))

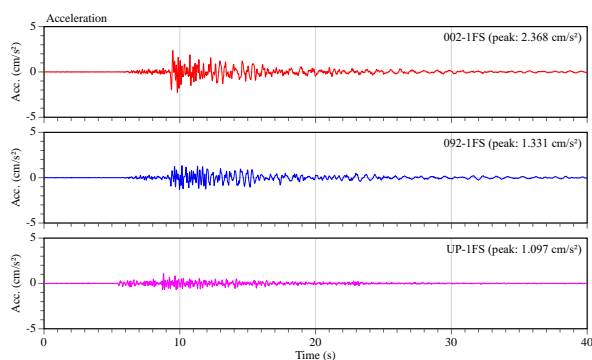
(屋上 WJMC4 / 1 階 WJMC2)

図 4.5-25 WJMC (令和 6 年 (2024 年) 4 月 11 日 13 時 16 分)

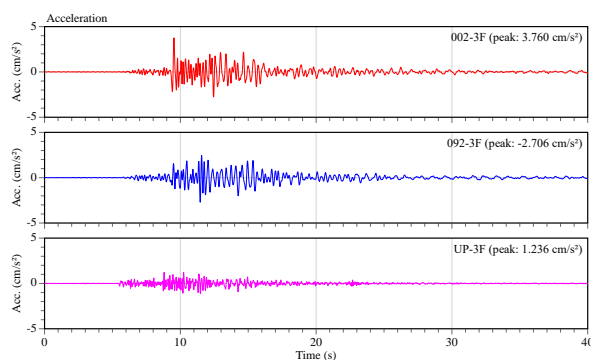
(3) WJMF

WJMF で観測された令和 6 年 (2024 年) 4 月 11 日 13 時 16 分の余震記録の 1 階と 3 階の加速度波形とフーリエスペクトル、および水平成分の 3 階の 1 階に対するフーリエスペクトル比を図 4.5-26 に示す。加速度成分のラベル 002 は北から東回りに 2° の方位を表し、ほぼ北南方向に対応する。同様

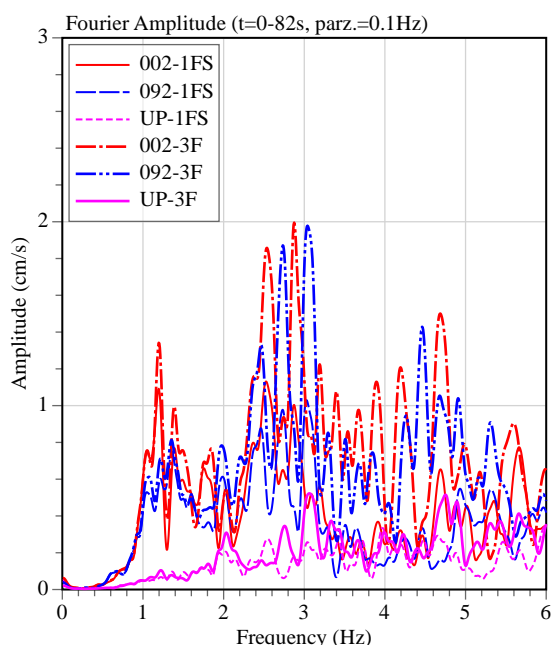
に 092 は 92° 、ほぼ東西方向である。1 階の記録から算出した計測震度は 0.7、1 階及び 3 階の最大加速度は数 cm/s^2 と大きな強震記録ではない。フーリエスペクトル比に着目すると、上段の振幅比には複数のピークが表れて 1 次固有振動数が判別しづらいものの、下段の位相差は 3.5Hz から 4.5Hz にかけて緩やかに反転しており、いずれの水平方向も 1 次固有振動数は約 4Hz と判断できる。



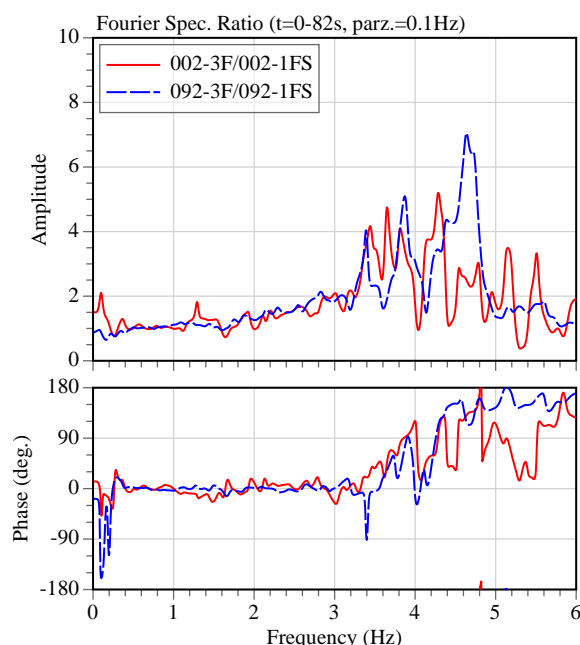
(i) 1 階加速度波形_南側 (WJMF3)



(ii) 3 階加速度波形_北側 (WJMF4)



(iii) フーリエスペクトル
(南側 1 階 WJMF3、北側 3 階 WJMF4)



(iv) フーリエスペクトル比
(北側 3 階 WJMF4 / 南側 1 階 WJMF3)

図 4.5-26 WJMF (令和 6 年 (2024 年) 4 月 11 日 13 時 16 分)

参考文献

- 4.5-1) 気象庁: 震度データベース, 2024 年 9 月閲覧
(<https://www.data.jma.go.jp/svd/eqdb/data/shindo/index.html>)
- 4.5-2) 国立研究開発法人防災科学研究所: 強震観測網 (K-NET, KiK-net), 2024 年 10 月閲覧
(<https://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>)
- 4.5-3) 国土技術政策総合研究所, 建築研究所: 平成 19 年 (2007 年) 能登半島地震建築物被害調査報告, 国土技術政策総合研究所資料 No.415, 建築研究資料 No.107, 2007 年 10 月

4.6 まとめ

本章では、令和6年(2024年)能登半島地震の地震動及び輪島市内における余震観測に関する調査を行った。分析及び調査結果のまとめを以下に記す。

- ① 本震では、防災科学技術研究所の K-NET 富来観測点と石川県自治体震度計の輪島市門前町走出観測点で震度7が記録された。また、能登地方の広い範囲で震度6強以上の地震動が多数観測された。
- ② 応答スペクトルを用いた分析より、能登地方で観測された震度5強以上の地震動は日本の代表的な強震観測記録と同等またはそれ以上の形状を示すものが多かった。
- ③ K-NET 輪島、気象庁輪島、K-NET 穴水、KiK-net 珠洲、K-NET 正院は、一般的な中低層建築物が大きな振動被害を受けやすいと考えられる周期1秒から2秒の範囲で大きな S_a-S_d 曲線を示した。
- ④ 震度6強以上の地震波について、鉄筋コンクリート造建築物を模擬した弾塑性応答解析に基づいた弾塑性変位応答スペクトル解析を行ったところ、降伏時周期1秒の構造で K-NET 穴水で観測された地震動に対する変位応答が、平成30年(2018年)北海道胆振東部地震の際に K-NET むかわ町松風で観測された地震動に対する変位応答の約1.1倍となったことから、能登半島地方の揺れが過去の被害地震の揺れを超えるものであったと考えられる。
- ⑤ 同じ地震において観測点の位置が1km程度離れた2つの地震計で観測された地震波を用いてそれぞれ計算した変位応答を比較し、大きく異なる結果が得られた。これは地盤条件が異なっていることに起因すると考えられる。また、高層建物の固有周期と言われる周期帯での変位応答が、過去の地震におけるものを超える観測点もあった。
- ⑥ 主な被災地の地震動の特性と建築物の地震入力及び地震応答を調査するため、令和6年(2024年)4月10日から5月8日の期間に輪島市内の7カ所において余震観測を実施した。
- ⑦ 余震観測を実施した輪島市中心地(低地側)では1Hz前後の地震動が卓越するため、K-NET 輪島観測点と比べて最大速度振幅や計測震度相当値が相対的に大きくなる。特に気象庁輪島に近接する観測点では、その傾向が顕著であった。
- ⑧ 本震において、K-NET 輪島は周期0.1秒付近で最大応答加速度を示すのに対し、気象庁輪島は周期1.2秒付近で最大応答加速度を示した。余震観測記録を用いた応答スペクトルによる分析においても、K-NET 輪島に近い観測地点の記録は短周期側で最大応答加速度を示すのに対し、気象庁輪島に近い観測地点では、同じ地震による K-NET 輪島よりも長い周期帯で最大応答加速度を示した。
- ⑨ 輪島市の3カ所の建築物の余震観測を行った。その観測分析より、WJMCの1次固有振動数はいずれの水平方向も4Hz程度、WJMFの1次固有振動数も両方向4Hz程度であることがわかった。WJMS(輪島市役所)については1次固有振動数の同定が困難であった。