

第3章 地震・地震動の特徴

本震は、10月23日17時56分に発生した。気象庁により震源の深さは13km、地震のマグニチュードは6.8と推定された。気象庁の観測点では、川口町川口（川口町役場）で1995年兵庫県南部地震以来となる震度7が観測されたほか、山古志村竹沢、小国町法坂、小千谷市城内の3点で震度6強の極めて強い揺れが観測された。また、このほか多数の地点で震度6弱の揺れが観測されている。

文部科学省防災科学技術研究所（以下、防災科研）が実施している全国強震観測ネットワーク(K-NET)では、小千谷市土川地点で非公式ではあるが震度7に匹敵する揺れを記録した。また、同ネットワークの十日町市高山観測地点では、水平動で約1.7Gの最大加速度を記録している。

被災地域周辺は、1964年6月16日の新潟地震時には震源から遠く直接の影響はなく、1961年の長岡地震で被害を経験して以来、現在まで大きな地震被害を経験していない。

今回の地震の特徴の一つは、本震のあと、多数の余震が発生したことで、いくつかの余震は、本震の規模に近いマグニチュード6以上とされた。

また、この地震では震源周辺の広い範囲で極めて大きい地震動が観測された。マグニチュードが6.8（気象庁発表）と、内陸地震としては大きく、また震源が浅かったことから、大きな加速度振幅が記録されている。観測を実施した機関は、主として気象庁、各自治体および防災科研のK-NET、KiK-net 強震観測網である。本震で震度7とされた川口町観測点については、最大加速度振幅が東西方向が 1675cm/s^2 、南北成分が 1141cm/s^2 、上下動も 867cm/s^2 と、従来の大振幅記録を上回るレベルの大きな加速度振幅が観測されている。また各市役所、町村役場では自治体の震度計が設置されていて、最大加速度、計測震度が公表されている。また、主要な観測点では加速度波形のデジタル値も公表されている

3.1 地震の概要と特徴

3.1.1 本震と余震

気象庁によると、本震発生から11月22日に至る1ヶ月間に、最大震度1以上の有感地震がちょうど800個発生した。最大震度は、本震時に川口町川口で記録された震度7である。本震のマグニチュードは気象庁によって6.8と発表されたが、余震の最大のマグニチュードは6.5である。本震と主な余震の位置を図3.1に示すが、いずれも小千谷市、川口町、旧堀之内町一帯の被災中心地域の直下で起こっていることが分かる。前出の本震発生後の1ヶ月間の有感地震800個における最大震度の内訳は、震度7が1、震度6強が2、震度6弱が2、震度5強が8、震度5弱が5、震度4が40、震度3が95、震度2が229、震度1が418となっている。（11月22日気象庁HPによる）このうち震度6強を伴った規模の大きな余震は、ほとんどが本震発生直後に起こっているが、4日後の27日の午前中にもマグニチュード6.1の余震が本震の発生位置

のやや東側で発生している。

本震震源は、後述するように西側の上盤側が東側の下盤側にのりあげた逆断層タイプであり、1995年兵庫県南部地震の震源の横ずれ断層とはタイプを異にしている。

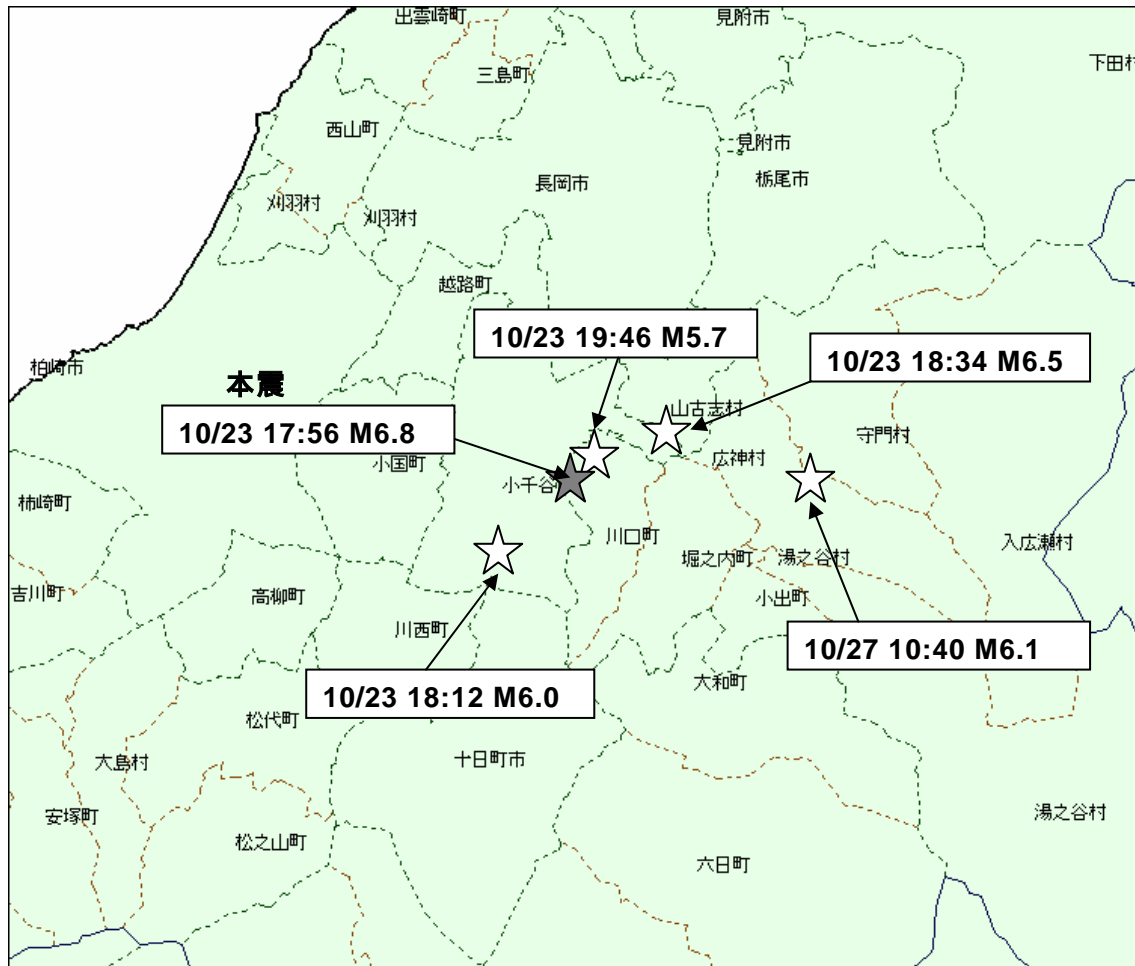


図 3.1 本震と主な余震の発生位置

3.1.2 震源のメカニズム

2004年新潟県中越地震の震源メカニズム解と震源過程について述べる。図3.2に気象庁によって決定された一元化震源分布と、震源メカニズム解を示す。震源メカニズムと一元化震源分布より、本震は、西側の岩盤が東側の岩盤の上に乗上げた逆断層型の地震であることが推定される。余震の大部分は、北北東-南南西方向に長さ約30 km 幅約20 km に分布している。地震調査研究推進本部によると、高精度に決定された余震活動分布より、複数の断層面が確認されており、大きな余震は本震と異なる断層面で発生している事が指摘されている。東京大学地震研究所の資料によると、余震活動領域は小平尾断層・六日町盆地西縁断層帯近傍に位置しており、これらの断層帯を境にして、堆積層の深さが急激に変化していることが指摘されている。

大地震が発生すると、全世界の地震計ネットワークにより、地震動を観測することができる。これらの地震動は、地下構造の情報と、断層面での破壊伝搬過程の情報を有している。適切に地下構造の影響を評価することにより、断層面での破壊伝搬過程の推定が可能となる。ここでは、全世界的な地震計観測網の実体波記録(遠地実体波記録)と、日本全国に密に配置された強震動観測網の記録(近地強震動記録)を使用して、断層面での破壊伝搬過程を推定する。

一般に遠地実体波記録は近地強震動記録に比べて、地下構造の影響を評価することが容易で、震源全体のモーメント解放履歴やモーメント解放領域の深さを決定するのに優れている。これに対して近地強震動記録は、観測点近傍における断層の動きの詳細な情報を有しており、時空間の分解能が高い。

従って、両者を同時に使用することにより、高精度・高分解能な震源過程の推定ができる。ここで、遠地実体波として、Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS)によって収録されている広帯域地震計観測点の記録12点を、近地強震動記録として、気象庁によって観測された強震動記録4点を使用した(図3.2)。観測点の方位分布は良好である。遠地実体波記録は、0.001~2 Hzのバンドパスフィルターをか

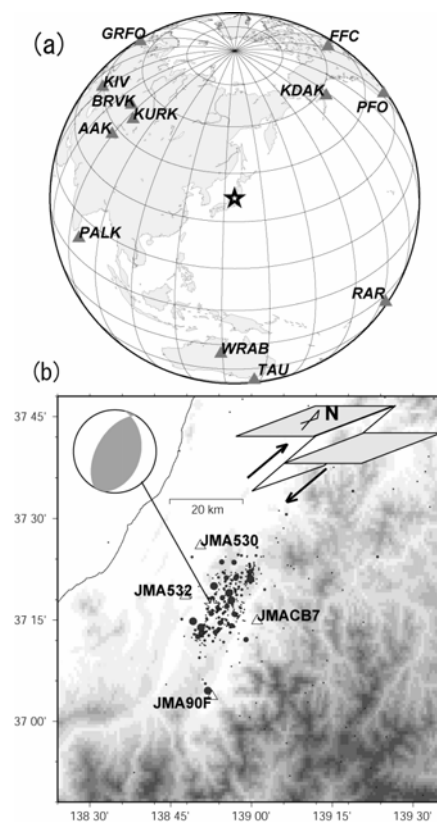


図 3.2 使用した観測点分布 (a) 遠地実体波記録、(b) 近地強震動記録、丸印は気象庁一元化震源、震源メカニズム解は本解析の結果を示す。

け、10 Hz サンプリングの変位波形に変換した。近地強震動記録は、0.05 ~ 0.5Hz のバンドパスフィルターをかけ、10 Hz サンプリングの変位波形に変換した。速度構造は、地震研究所のホームページに掲載されている Double-Difference トモグラフィー法によって決定された速度構造を参考に複数の速度構造を仮定し、最も波形を説明する速度構造を最終的に使用した。また観測点直下が厚い堆積層に覆われている観測点については、厚さ 2 km の堆積層を挿入した。

断層面は、防災科学技術研究所が決定した値と遠地実体波を参考にして、(走向、傾斜) = (210°、54°) とした。震源は、気象庁の一元化震源を使用すると、断層近傍の観測点(特に、JMACB7)の波形が説明できないため、波形を最も説明できる震源位置をグリットサーチ法により求めた。震源深さ 10.5 km における残差分布を図 3.3 に示す。地震波形を最も説明する震源は(緯度、経度、深さ) = (37.30°N、138.84°E、10.5 km) となり、気象庁一元化震源よりも、約 5 km 程西にずれる。これは、震源より西側の観測点は厚い堆積層に覆われているために、実際の震源より、系統的に東側に決定されている可能性があることを示唆している。

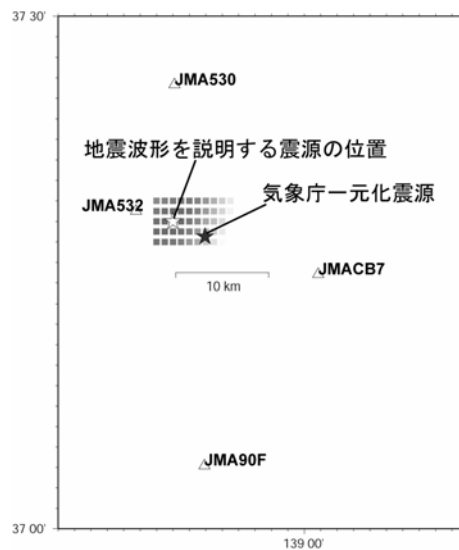


図 3.3 深さ 10.5 km における波形の残差変化分布、濃い色の点ほど観測波形が再現されている事を示す。

図 3.4 に本震時の地震時すべり量分布を示す。地震モーメント $M_0 = 8.1 \times 10^{18} \text{ Nm}$ となり、他の機関が決定している値とほぼ一致する。その一方で、モーメントマグニチュード (M_w) は、6.5 となり、気象庁マグニチュードより、0.3 も小さい。ここで、モーメントマグニチュードは、地震の規模を表現するのに最も適した値である。最終的に得られた平均的な滑り角度は、100° となる。破壊継続時間は、11 秒、最大すべり量は、約 3.7 m となる。地震の断層滑りによるせん断応力降下量を求めると、震源付近と地表付近で、約 30 MPa に達する。

図 3.4 に得られたモデルから再現された地震波形と観測された地震波形の比較を示す。遠地実体波と近地強震動記録が共に良く再現されており、得られたモデルは妥当である事が示唆される。

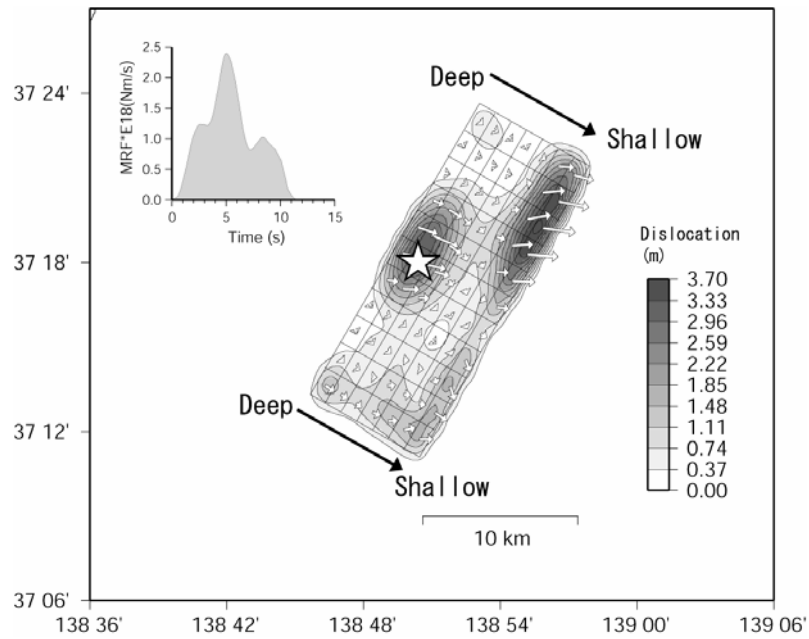


図 3.4 本震時の地震時すべり量分布と震源時間関数

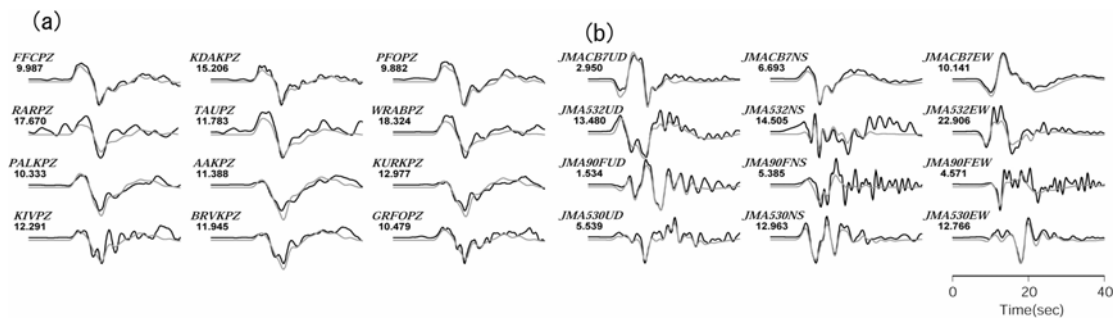


図 3.5 観測波形（黒線）と理論波形（灰色線）との比較、(a) 遠地実体波、観測点名の下に書いてある数字は最大振幅 (μm) (b) 近地強震動記録、観測点名の下に書いてある数字は、最大振幅 (cm)

3.2 被災地の地形・地質

3.2.1 地形・表層地質

被災地の地形・表層地質は、参考文献 1)～3)に詳しい。新潟県の中央部を占める中越地方は、福島県・群馬県境を成す標高 1,500～2,000mの山岳地域(越後山脈)、標高 300-400mの魚沼丘陵・東山丘陵・東頸城丘陵などの低平な丘陵と、その間の六日町盆地・十日町盆地や新潟平野南端部などの盆地状低地によって構成されている^{1),2)}。これらの丘陵の稜線、盆地の形状などの地形要素は、北北東-南南西の顕著な方向性を示している^{1),2)}。

表層地質に関して概観すると、中・古生界および古第三系の変成岩・深成岩・堆積岩類が南東部の福島・群馬県境の越後山脈に分布し、険しい地形を作りあげている^{2),3)}。中新統・鮮新統などの第三系地層は、丘陵部に分布する。魚沼丘陵は、東縁および北西端を除いて大部分が鮮新世-更新世の魚沼層からなる²⁾。東山丘陵は、大部分が中新統-鮮新統からなり、魚沼層は一部にしか分布していない²⁾。東頸城丘陵の東端にあたる丸山丘陵は、主として魚沼層のシルト・砂からなり、大規模な背斜を成している²⁾。魚沼丘陵・東山丘陵は、地質構造的には東縁を新発田-小出線によって画された複背斜帯に相当し、中期更新世以降現在に至る傾動隆起帯である²⁾。更新統・完新統などの第四系地層は、扇状地、盆地状低地や丘陵部の地すべり箇所分布している^{1),2)}。十日町盆地・小千谷台地の長軸に沿って北流する信濃川および支流域に幾段にも発達している段丘は、中期更新-完新世に形成され、高位の段丘面ほど古く、かつ信濃川に向かった傾斜が著しい^{2),3)}。これらの地域での各種探査結果から、十日町盆地・小千谷地域の信濃川沿い及び小出以西の魚野川沿岸の氾濫原堆積物はおおむね10-20m程度と推定されおり、厚い沖積層の発達する六日町盆地とは異なっている²⁾。六日町盆地は、越後山脈の西側に北北東方向に細長く(最大幅5km、長さ約40km)分布し、この盆地の軸に沿って南から魚野川が、また北から破間川が流下し、小出付近で合流している²⁾。盆地内は100mを越す厚い礫層によって埋積され、その上に魚野川・破間川の氾濫原堆積物や、東方の越後山脈や西方の魚沼丘陵から流れ込む数多くの支流が作る扇状地性堆積物が覆っている²⁾。この盆地は、十日町盆地とは対照的に更新世の段丘がほとんど分布しない²⁾。新潟平野には扇状地堆積物、氾濫原堆積物、河道及び後背湿地堆積物、自然堤防堆積物などの沖積層(完新統、一部更新統)が広く分布する。また、魚沼丘陵には地すべり堆積物が各地に広く分布する¹⁾。

3.2.2 地下構造

被災地の地下構造は、参考文献 4)～6)に詳しい。本地域は、柏崎-銚子構造線と新発田-小出構造線には含まれる新潟油田地域の堆積盆の中心にあたり、油・ガス田が数多く分布することから、それらの探鉱及び採鉱のために数多くの坑井が掘削・調査が行われており、それらの調査結果より地下深部の地質構造が詳細に明らかになっている⁴⁾。特に注目される点は、北部フォッサマグナ地域に連続する広大な堆積盆地に堆積した堆積物の一部をなす新第三系各層が堆積盆地の中心部で厚く累重し、全層厚は5,000m以上に達している^{1),4),5)}。

本地域における浅部地下構造は、上越新幹線や関越自動車道などの工事に伴って実施されたボーリング等地質調査資料に纏められている(例えば 7)。これらの中で、ごく表層のせん断波速度が公表されている K-NET 小千谷(NIG019)の土質図を図 3.6 に示す 8)。当該地点の表層地質は完新世の段丘堆積物であり、深さ 3 m 以深からせん断波速度が 340m/s 以上の礫や岩盤が存在している。試みに、深さ 4 m と 9 m を地層境界と考えた地盤モデルを作成し、理論的に計算される鉛直入射せん断波の増幅特性は、共に周期 0.25 秒が卓越した。

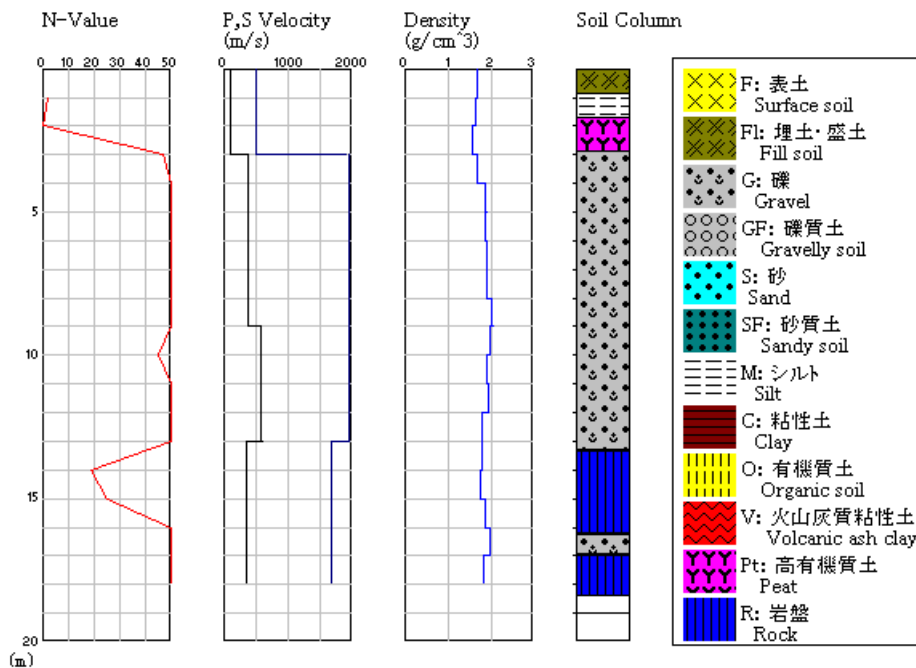


図 3.6 K-NET 小千谷(NIG019)の土質図 8)

参考文献

- 1) 小林巖雄・立石雅昭・吉岡敏和・島津光夫、長岡地域の地質(試行版)、地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)、地質調査所、1991
(http://www.gsj.jp/jishin/chuetsu_1023/doc_pdf/07_038/chapter-1.pdf 等)
- 2) 柳沢幸夫・小林巖雄・竹内圭史・立石雅昭・茅原一也・加藤碩一、小千谷地域の地質(試行版)、地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)、地質調査所、1986
(http://www.gsj.jp/jishin/chuetsu_1023/doc_pdf/07_050/chapter-1.pdf 等)
- 3) 日本地質図体系中部地方、pp.120-121、朝倉書店、1991
- 4) 日本の地質「中部地方」編集委員会編、日本の地質4 中部地方、共立出版、1990
- 5) 小林巖雄・立石雅昭・吉岡敏和・島津光夫、5万分の1地質図幅「長岡」、地質調査所、1991
- 6) 柳沢幸夫・小林巖雄・竹内圭史・立石雅昭・茅原一也・加藤碩一、5万分の1地質図幅「小千谷」、地質調査所、1986
- 7) 建設省北陸地方建設局北陸技術事務所、新潟県平野部の地盤図集(新潟平野編)、昭和56年3月

8) <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>

3.3 本震の地震動特性

3.3.1 地震動強さの分布

気象庁及び各都道府県が管理する震度情報ネットワーク^{1), 2)}、K-NET³⁾及び KiK-net⁴⁾で得られた計測震度の分布を図 3.7 に、最大加速度の分布を図 3.8 に示す。なお K-NET と KiK-net の計測震度は強震記録から算出した参考値である。図中 □ は気象庁と地方自治体の震度情報ネットワークの観測地点を、○ は K-NET と KiK-net の観測地点を、また ☆ は震央位置を表す。また最大加速度は 3 成分の合成値を採っている。

震度の分布を見ると、震央近傍で震度 7 が 2 箇所(新潟県震度情報ネットワークの川口町と K-NET の小千谷)観測されており、震度の大きな地点が断層に沿って北東-南西に長く分布している。最大加速度の分布を見ても、やはり 500 cm/s^2 を超える地域が震央を中心に北東-南西に長く分布しており、震央付近の数地点では 1000 cm/s^2 を超える加速度が観測されている。

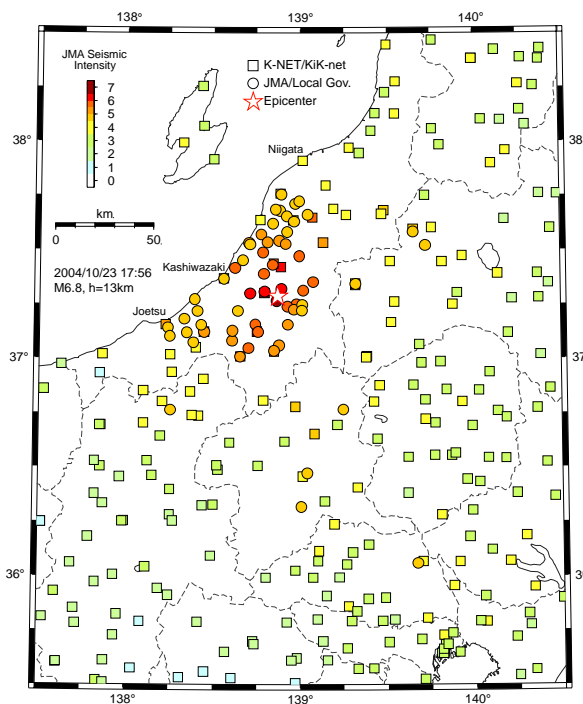


図 3.7 新潟県中越地震本震(2004/10/23 17:56)の震度分布

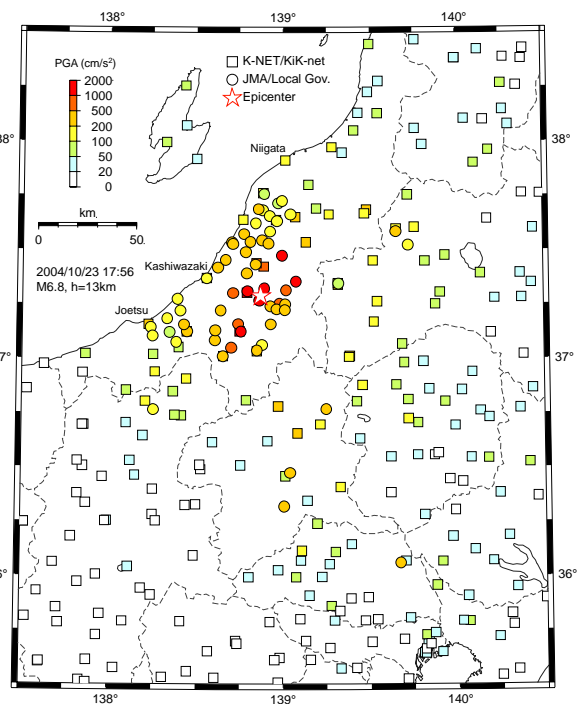


図 3.8 新潟県中越地震本震(2004/10/23 17:56)の最大加速度分布

3.3.2 震央付近の強震記録

前述した 4 つの観測網の記録のうち、気象庁(JMA)の計測震度計や新潟県、福島県、群馬県の震度情報ネットワークの一部の記録が気象庁の Web サイト¹⁾と CD-ROM²⁾で、K-NET 及び KiK-net の強震計で得られた強震記録がそれぞれの Web サイト^{3), 4)}で公開されている。公開されている震度 5 以上(計測震度 4.5 以上)の強震記録の一覧を表 3.1 に示す。これほど多くの震度 5 以上に相当する強震記録が得られたのは初めてのこと

であり、地盤上の観測網の充実を示すものと言える。

このうち震央近傍の観測地点の位置を図 3.9 に示す。図中 は気象庁及び新潟県の震度情報ネットワークの観測地点を、 は K-NET 及び KiK-net の観測地点を、また は震央位置を表す。以下主な強震記録(表中太字のもの)についてその特徴を分析する。

表 3.1 気象庁及び自治体の震度計^{1), 2)}、K-NET³⁾及び KiK-net⁴⁾の強震計による震度 5 弱(計測震度 4.5)以上の強震記録(2005 年 2 月現在で公開されているもの)

種別	記号	地名	距離 (km)	計測 震度	最大加速度 (cm/s ²)			最大速度 (cm/s)		
					NS	EW	UD	NS	EW	UD
新潟	65042	川口町	2.5	6.5	1141.9	1675.8	869.6	44.57	134.57	62.26
新潟	65041	山古志村	4.3	6.3	538.4	721.8	1059.1	100.99	90.20	68.79
K-NET	NIG019	小千谷市	7.0	6.7	1144.3	1313.5	820.0	96.14	132.13	31.16
JMA	JMA532	小千谷市	7.0	6.3	779.2	897.6	730.8	60.79	92.63	23.25
K-NET	NIG020	小出市	10.6	5.5	521.8	407.6	312.2	31.72	25.52	14.56
新潟	65044	小出市	10.8	5.2	280.4	322.8	243.6	22.61	24.50	13.03
JMA	JMACB7	広神村	13.8	4.7	333.9	286.4	310.8	15.55	13.68	5.39
新潟	65057	小国町	14.1	6.0	394.6	691.8	339.5	34.98	64.69	14.40
新潟	65045	湯之谷村	14.5	4.6	259.8	251.4	185.4	13.31	12.63	6.01
K-NET	NIG028	長岡支所	15.1	6.1	870.5	706.1	435.6	61.85	60.55	26.05
新潟	65052	大和町	15.5	5.2	405.7	384.8	366.3	21.98	21.19	5.92
JMA	JMA530	長岡市	16.2	5.5	395.8	430.3	324.5	31.30	23.55	16.85
K-NET	NIG017	長岡市	16.9	5.5	468.5	369.0	331.0	40.05	23.55	15.05
新潟	65048	川西町	17.0	5.7	824.0	681.4	648.7	38.16	49.37	13.51
新潟	65053	入広瀬村	18.6	5.5	992.3	758.9	275.8	22.86	21.04	8.05
新潟	65028	十日町市	20.9	5.9	1161.0	665.0	405.8	52.13	39.57	9.40
K-NET	NIG021	十日町市	21.1	6.2	1715.7	849.2	564.4	58.87	44.82	13.62
新潟	65056	高柳町	21.6	4.7	202.5	149.7	170.6	11.95	12.54	7.03
新潟	65030	栃尾市	23.2	5.5	665.8	764.6	369.3	32.89	22.92	11.46
新潟	65036	三島町	23.6	5.5	283.3	345.7	219.0	33.47	29.57	14.71
新潟	65059	西山町	25.4	4.9	226.1	190.4	136.4	19.89	16.86	7.84
JMA	JMA90F	六日町	25.3	5.2	136.0	111.3	186.5	25.44	18.57	9.16
新潟	65037	与板町	28.1	5.3	318.7	294.6	257.1	24.33	19.01	10.73
新潟	65050	塩沢町	28.2	5.2	409.6	428.1	194.2	27.69	23.16	4.80
新潟	65029	見附市	28.3	5.3	198.5	203.3	118.4	30.32	32.98	11.22
新潟	65034	中之島町	28.4	5.4	171.5	225.1	123.1	29.78	33.11	8.43
K-NET	NIG022	塩沢町	28.4	5.1	342.1	341.6	126.5	17.98	21.14	3.63
K-NET	NIG018	柏崎市	28.8	4.9	97.9	144.3	75.6	13.09	28.71	6.83
新潟	65039	出雲崎町	29.9	4.7	177.3	193.0	145.9	17.72	12.58	7.58

新潟	65055	中里村	30.5	5.9	617.7	747.8	241.0	45.17	62.34	9.08
新潟	65007	松之山町	32.5	5.0	129.1	204.1	79.9	20.19	14.33	5.30
新潟	65038	和島村	32.6	5.2	239.8	268.5	124.0	33.03	20.99	9.93
新潟	65033	栄町	33.2	4.9	140.8	123.5	76.1	21.89	18.62	10.49
KiK-net	NIGH09	下田村	35.9	5.2	368.4	390.4	244.7	14.70	13.69	5.23
K-NET	NIG023	津南町	36.1	5.0	397.0	274.6	86.5	27.87	28.12	9.37
新潟	65054	津南町	36.4	5.1	441.7	304.3	103.9	31.77	26.82	8.86
新潟	65084	分水町	37.2	4.7	139.1	148.7	74.5	21.72	18.02	6.94
新潟	65024	三条市	39.5	4.9	190.5	110.0	57.9	15.06	13.12	6.01
K-NET	NIG014	三条市	39.7	4.8	117.6	96.3	76.2	14.59	13.81	6.13
KiK-net	FKSH21	只見町	40.0	5.1	246.4	361.9	137.5	14.58	16.18	5.52
福島	57071	只見町	40.0	4.7	117.7	165.6	106.0	10.97	10.44	3.71
K-NET	FKS028	只見町	40.1	4.7	141.3	167.0	123.2	11.22	11.96	3.89
新潟	65064	燕市	41.0	4.7	140.0	145.3	65.6	17.33	20.87	5.19
新潟	65013	吉川町	41.6	4.7	140.4	123.6	51.1	11.16	11.57	3.24
新潟	65004	安塚町	41.6	5.3	319.0	218.5	41.3	17.40	13.44	3.65
K-NET	NIG024	安塚町	41.7	5.0	240.0	217.6	55.2	13.73	9.54	3.46
新潟	65005	浦川原村	41.8	4.5	122.0	204.9	70.5	6.55	8.12	3.85
新潟	65010	柿崎町	42.2	4.5	132.8	103.2	66.1	12.11	9.85	4.05
新潟	65085	吉田町	43.8	4.5	105.7	106.3	53.7	16.27	16.84	6.06
KiK-net	NIGH06	加茂市	43.9	5.7	356.1	409.2	205.4	24.91	25.30	12.47
新潟	65027	加茂市	44.3	4.6	140.9	129.3	49.1	13.05	13.60	5.13
新潟	65083	弥彦村	44.3	4.8	137.2	168.0	84.7	15.98	17.14	8.87
新潟	65092	中之口村	48.1	4.7	74.5	73.4	51.3	13.37	20.27	5.23
新潟	65009	牧村	49.0	4.5	108.5	126.7	53.1	7.43	8.41	4.53
新潟	65012	頸城村	49.0	4.5	108.5	81.8	26.3	9.42	11.34	3.05
新潟	65091	月潟村	49.7	4.6	112.7	115.8	60.4	14.36	16.00	5.12
新潟	65019	三和村	49.8	4.6	87.0	88.1	32.7	15.03	12.54	4.39
JMA	JMA90E	巻町	52.2	4.5	94.6	92.8	35.4	12.04	13.09	5.51
K-NET	NIG013	巻町	52.6	4.5	95.5	129.2	38.8	13.36	13.99	5.14
K-NET	GNM002	水上市	57.4	4.5	341.0	279.4	194.5	8.12	6.17	2.95
新潟	65003	上越市	58.1	4.5	96.4	147.8	34.6	7.38	8.56	3.35
JMA	JMAE1C	上越市	58.6	4.5	74.4	139.0	23.9	6.92	8.19	2.18
K-NET	NIG025	直江津	58.8	5.2	189.9	200.5	38.4	16.63	18.62	2.84
JMA	JMAD19	片品村	67.1	4.5	162.0	200.0	101.6	4.85	8.93	2.76
K-NET	NIG012	鹿瀬町	69.5	4.9	236.7	291.1	62.9	16.26	14.78	3.46
K-NET	GNM003	沼田市	72.9	4.7	359.0	292.6	126.0	8.43	7.13	2.81

JMA	JMA8B0	西会津町	76.4	4.5	184.2	135.8	56.1	10.50	8.30	2.98
K-NET	FKS022	西会津町	77.0	4.5	131.6	148.0	70.7	8.67	6.97	2.95
福島	57083	柳津町	79.8	4.5	130.4	91.2	39.3	8.52	6.62	2.63
群馬	60014	北橋村	91.6	4.7	323.0	262.4	141.4	8.10	7.63	3.47
群馬	60023	高崎市	108.6	4.6	255.2	262.8	76.3	8.85	7.46	3.19
JMA	JMA51E	久喜市	154.5	4.7	164.8	173.6	33.6	10.81	10.05	1.87

種別の欄の JMA は気象庁、新潟、福島、群馬は各県の震度情報ネットワークを表す。K-NET、KiK-net の計測震度は加速度記録から算出した参考値。

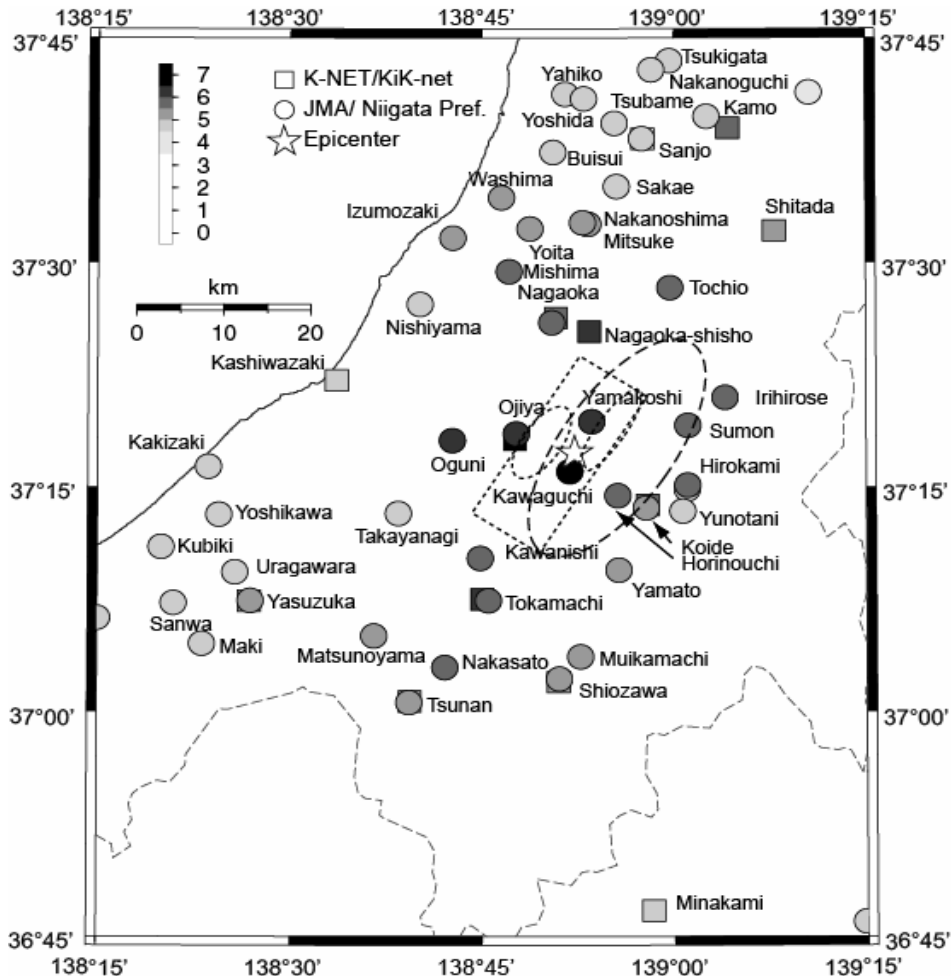


図 3.9 震央付近の強震観測記録が得られた気象庁、新潟県震度情報ネットワーク、K-NET 及び KiK-net の観測地点と震央位置。破線で描かれた大きな楕円は気象庁による余震領域。点線で描かれた長方形は八木による解析領域(3.1 節参照)で、その中の小さな点線の楕円は破壊の大きな領域。

(1) 川口町と山古志村の記録

新潟県の震度情報ネットワークの川口町と山古志村は、震央距離がそれぞれ 2.5 km と 4.3 km と近く、震源断層のほぼ真上に位置している。それぞれの震度計で得られた加速度記録と減衰定数 5% の擬似速度応答スペクトルを図 3.10 及び図 3.11 に示す。

川口町の震度計は川口町役場庁舎の裏手に設置されている。川口町の加速度記録(図 3.10)を見ると、激しい揺れが 10 秒間程度継続しており、最大加速度は NS(北南)方向で

1142 cm/s²、EW(東西)方向で 1676 cm/s² と非常に大きなものであった。応答スペクトルに着目すると、NS 成分と EW 成分の違いが特徴的で、EW 成分は周期 1.3 秒に明瞭なピークが表れ、その応答値は 500 cm/s に達する。一方 NS 成分の応答スペクトルは 0.2 秒から 2 秒程度の周期領域で平坦な形状をしており、応答値は 100 cm/s 以下である。この記録から見る限り川口町役場周辺の地震動は極めて方向性の強いものであったと考えられる。

山古志村で得られた記録(図 3.11)を見ると、加速度は形状には比較的周期の長い成分が観察される。応答スペクトルに着目すると NS 成分は 1.8 秒辺りにピーク(383 cm/s)を有し、EW 成分は 0.5 秒から 3 秒の周期領域の応答が 200 cm/s 程度と大きなものとなっている。最大加速度は NS 成分で 538 cm/s²、EW 成分で 721.8 cm/s² と他の記録ほど大きくはないが、この地震動が構造物に与える影響はかなり大きいと考えられる。

川口町と山古志村は震央を挟んで断層面上の南側と北側の近傍に位置し、上述したように観測された地震動はそれぞれ特徴的である。

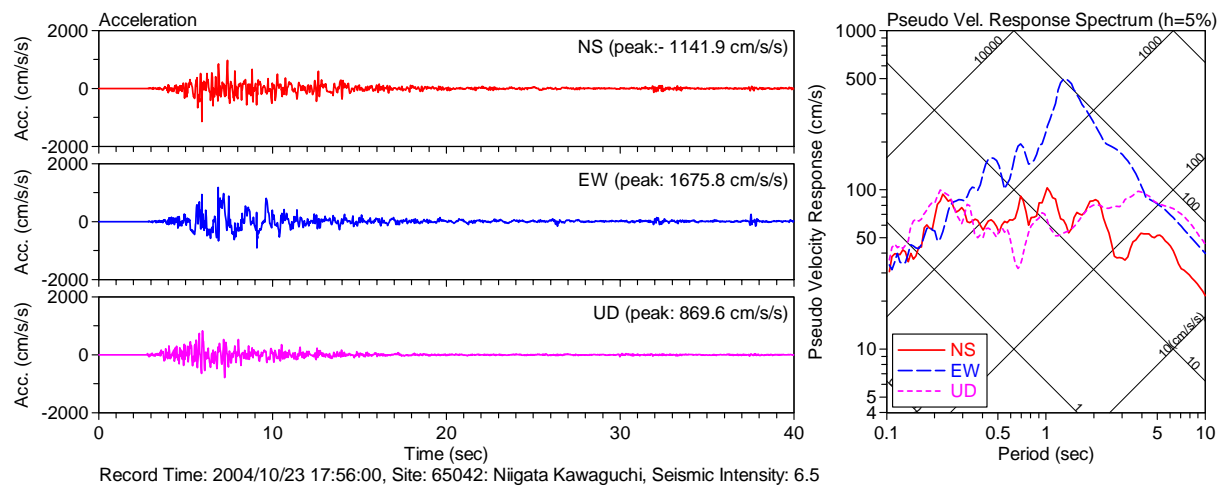


図 3.10 新潟県川口町(65042)で得られた加速度記録(左)と 5%擬似速度応答スペクトル(右)

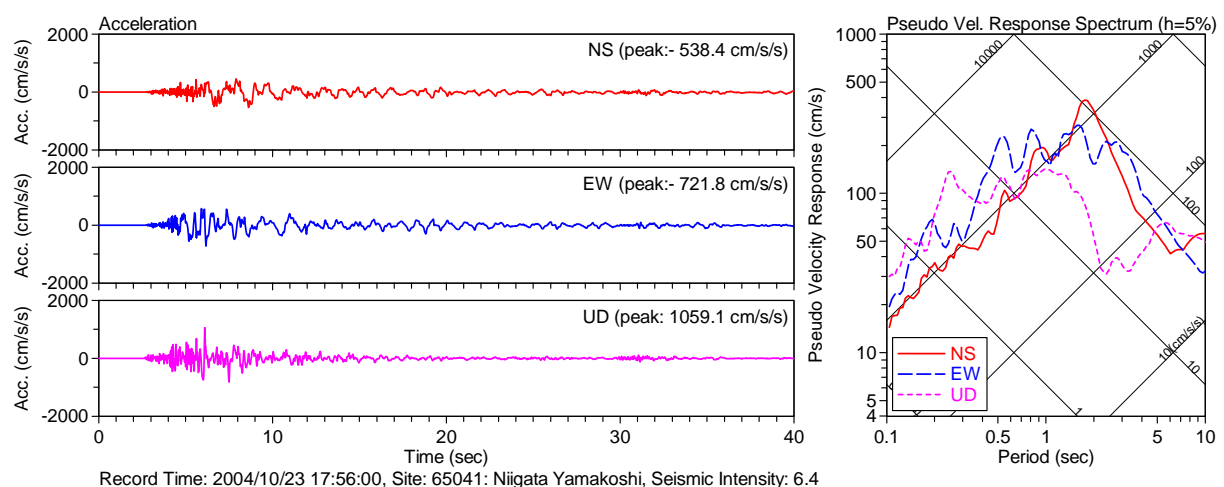


図 3.11 新潟県山古志村(65041)で得られた加速度記録(左)と 5%擬似速度応答スペクトル(右)

(2) 小千谷市の記録

小千谷市ではK-NETの観測地点(NIG019)と気象庁の震度計(JMA532)のふたつの強震記録が公開されている。また、小千谷市本町の免震建物でも強震観測が行われており、記録が得られている⁵⁾。以下それぞれ K-NET 小千谷、JMA 小千谷、免震建物(OJB)と称する。各観測地点の位置を図 3.12 に示す。いずれの地点も信濃川西岸の市街地に位置し、それぞれの観測地点間の距離は 700 m から 900 m 程度である。

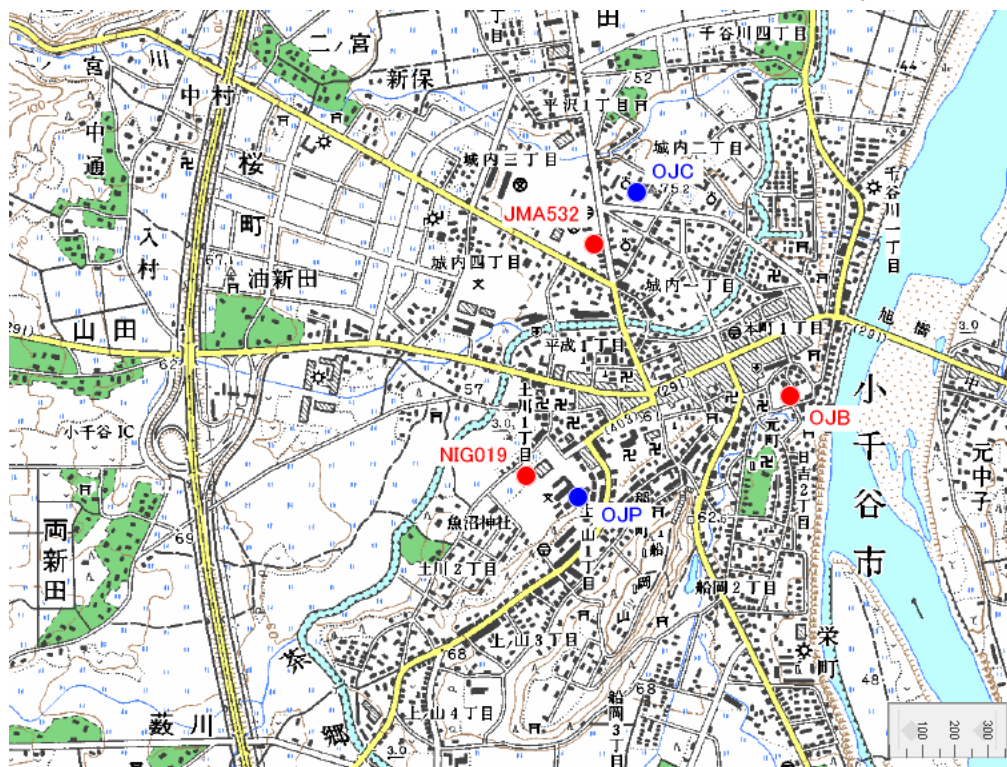


図 3.12 小千谷市内の強震観測地点(NIG019: K-NET 小千谷、JMA532: JMA 小千谷、OJB: 免震建物)の位置

本震時にこれらの観測地点で得られた計測震度、最大加速度及び最大速度を表 3.2 に、加速度記録と減衰定数 5% の擬似速度応答スペクトルを図 3.13 から図 3.15 に示す。免震建物の記録は免震層下部で得られたものである。加速度波形に着目すると三者とも全体的な傾向は似ているが、K-NET 小千谷の振幅は JMA 小千谷や免震建物に比して 1.5 倍程度大きい。また K-NET 小千谷の記録には大きな振幅の波形の頂部が尖る現象が認められ、表層地盤の液状化の影響が示唆される。また K-NET 小千谷の水平成分の応答スペクトルには 0.7 秒付近に卓越が認められ、他の 2 地点の記録と異なった様相を示す。

表 3.2 小千谷市内で得られた本震(2004/10/23 17:56 M6.8 h=13km)強震記録

記号	名称	距離 (km)	計測 震度	最大加速度 (cm/s ²)			最大速度 (cm/s)		
				NS	EW	UD	NS	EW	UD
NIG019	K-ENT 小千谷	7.0	6.7	1144.3	1313.5	820.0	96.14	132.13	31.16
JMA532	JMA 小千谷	7.0	6.3	779.2	897.6	730.8	60.79	92.63	23.25
OJB	免震建物	6.2	6.1	739.9	807.9	486.9	46.14	68.25	27.25

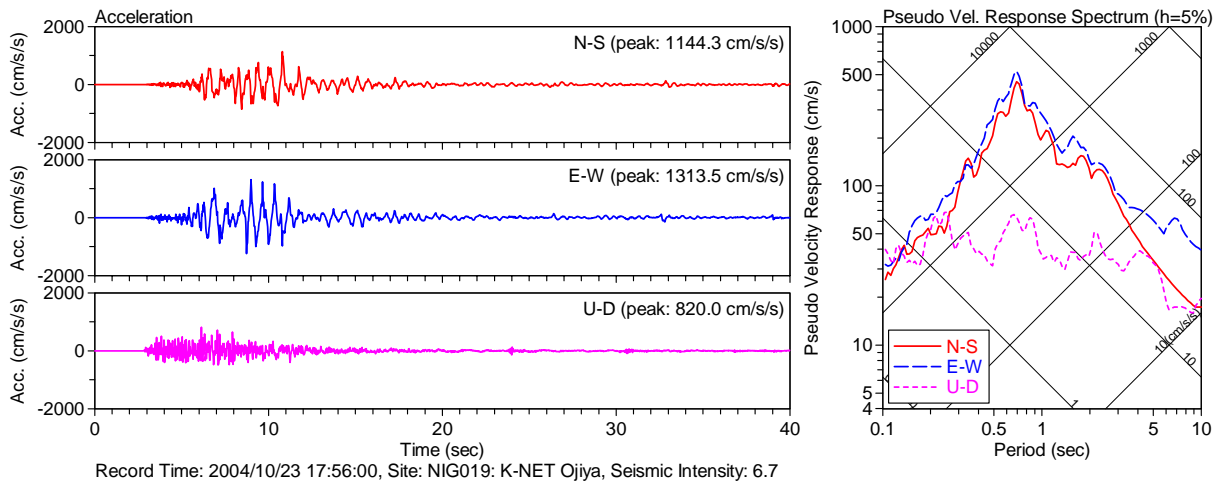


図 3.13 K-NET 小千谷(NIG019)で得られた加速度記録(左)と5%擬似速度応答スペクトル(右)

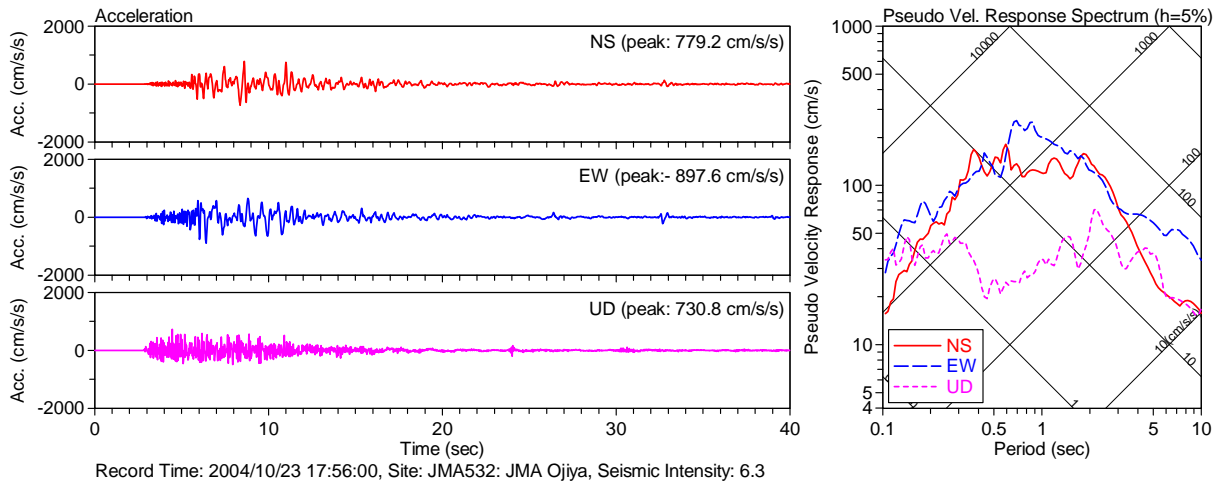


図 3.14 JMA 小千谷(JMA532)で得られた加速度記録(左)と5%擬似速度応答スペクトル(右)

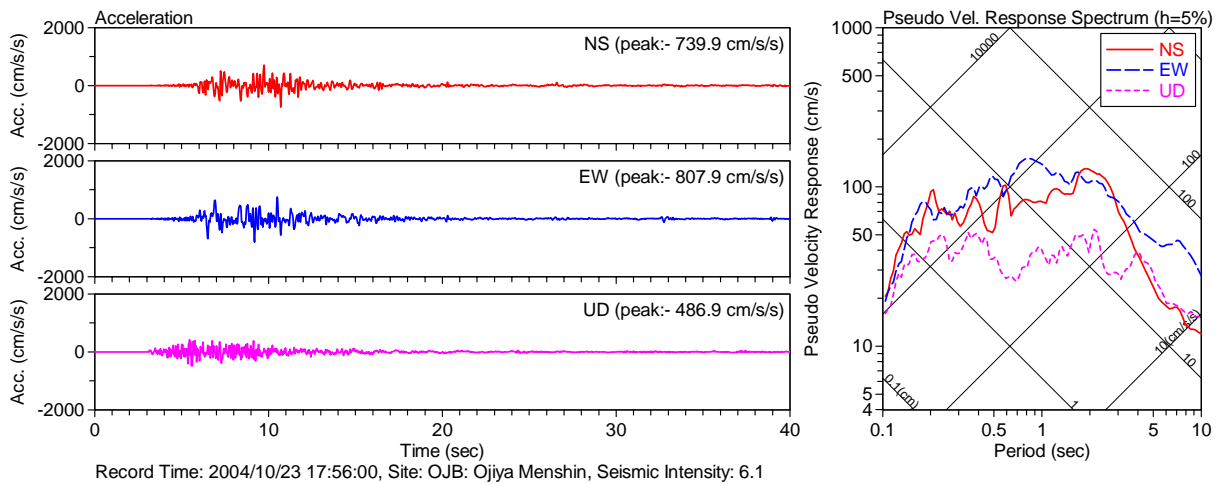


図 3.15 免震建物(OJB)で得られた加速度記録(左)と5%擬似速度応答スペクトル(右)

応答スペクトルの形状の違いを詳細に比較するために、北南(NS)、東西(EW)、上下(UD)の方位成分毎に3つの観測地点の応答スペクトルを重ねて図 3.16 に示す。水平成分、上下成分とも、1秒以上の長周期成分では3地点の記録の応答スペクトルはよく似

た形状を示しており、応答振幅にも大きな差は認められない。1秒以下の短周期成分では、特に水平成分で違いが表れ、K-NET 小千谷の0.7秒のピークが際立っている。また形状に共通点があるものの、0.2秒から2秒の広い周期領域で免震建物の記録の応答スペクトルはJMA 小千谷の応答スペクトルを下回っている。

図 3.17 は K-NET 小千谷及び免震建物の記録の JMA 小千谷の記録に対する応答スペクトル比である。前述の傾向が応答スペクトル比からも確かめられる。すなわち、K-NET 小千谷の記録は JMA 小千谷に比べ 0.7 秒前後の周期領域で最大 3 倍程度の大きな応答が認められる。一方免震建物の記録の応答スペクトルは NS 成分の 0.2 秒以下の短周期領域で若干 JMA 小千谷の記録の応答スペクトルを上回るが、全体的には 3 成分とも JMA 小千谷と同程度か下回る応答を示す。

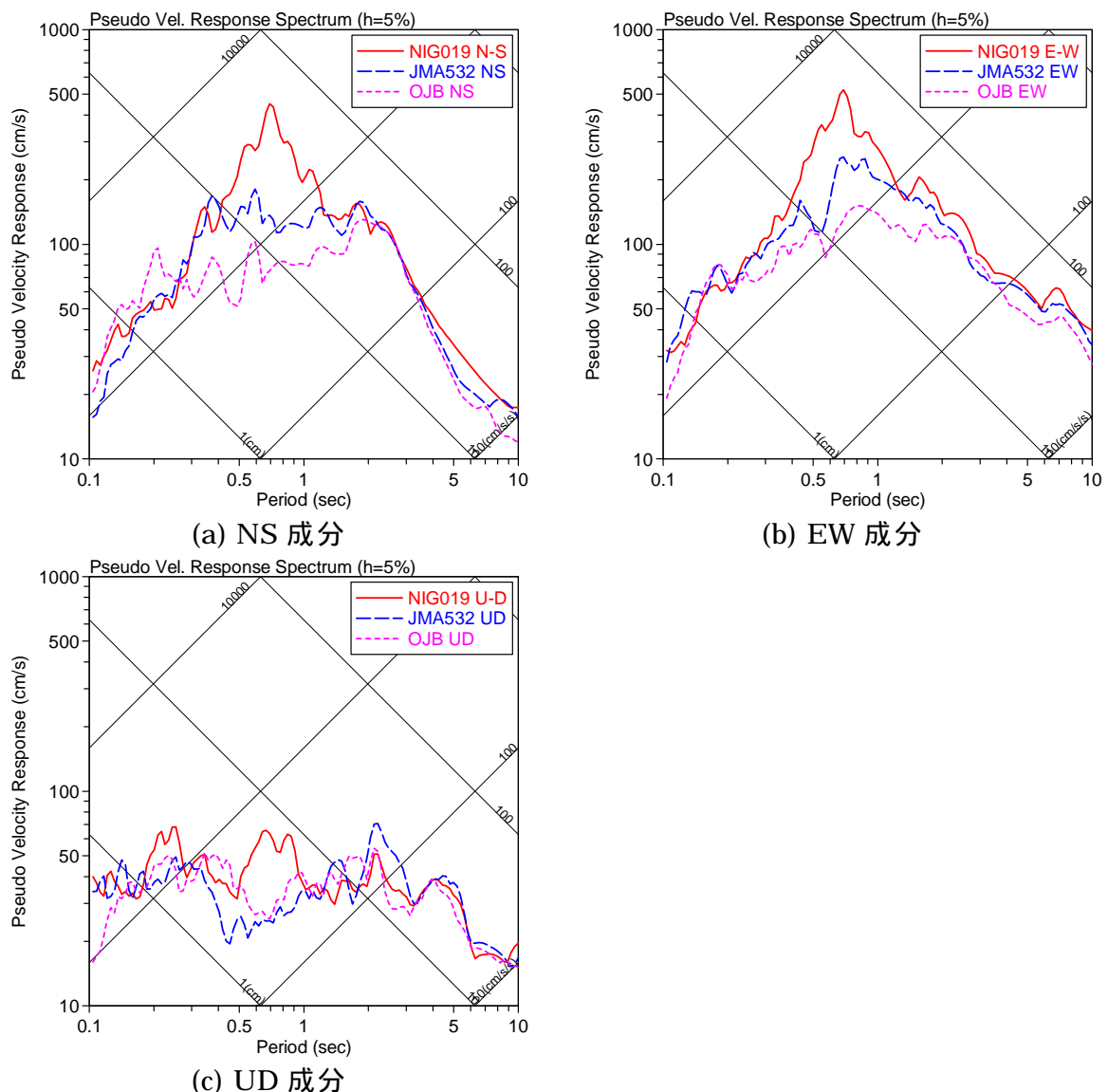


図 3.16 小千谷で得られた強震記録の方位成分毎の 5% 擬似速度応答スペクトルの比較

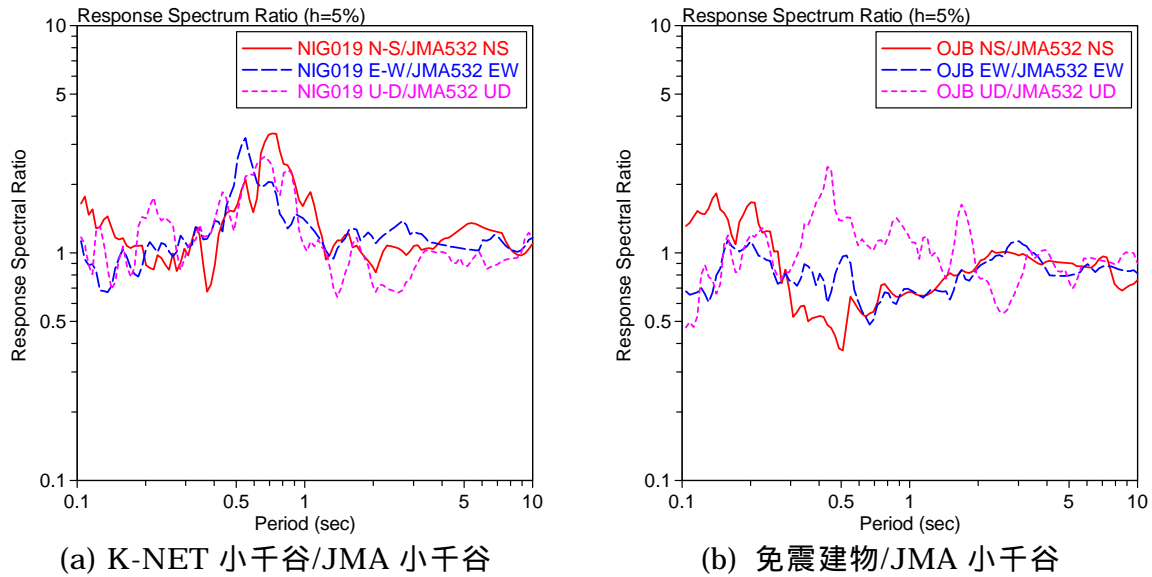


図 3.17 K-NET 小千谷及び免震建物の JMA 小千谷に対する 5% 擬似速度応答スペクトル比

(3) 十日町市の記録

十日町市には K-NET の観測地点と新潟県の震度計が設置されている。K-NET 十日町 (NIG021) 及び新潟県震度情報ネットワーク十日町 (新潟県十日町と称す) の加速度記録と減衰定数 5% の擬似速度応答スペクトルを図 3.18 と図 3.19 に示す。K-NET 十日町の加速度記録は NS 成分の最大加速度が 1716 cm/s^2 と非常に大きなものだが、激しい揺れの継続時間が極めて短い。また EW 成分は NS 成分の半分以下の最大加速度となっている。また水平成分の応答スペクトルは 0.2 秒から 0.3 秒に大きなピークを持つ特異な形状となっている。このような短周期成分の卓越は何らかの局地的な影響を受けている可能性が高く、地域を代表する地震動として扱うには注意を要する。一方新潟県十日町の記録は、波形の全般的な傾向は K-NET と似ているが、最大加速度は $2/3$ から $3/4$ 程度の値となっている。応答スペクトルも短周期成分の卓越という共通の特徴があるが、0.2 秒のピークは K-NET ほど顕著ではない。1 秒以上の長周期領域では形状、振幅レベルとも両者はほぼ一致している。

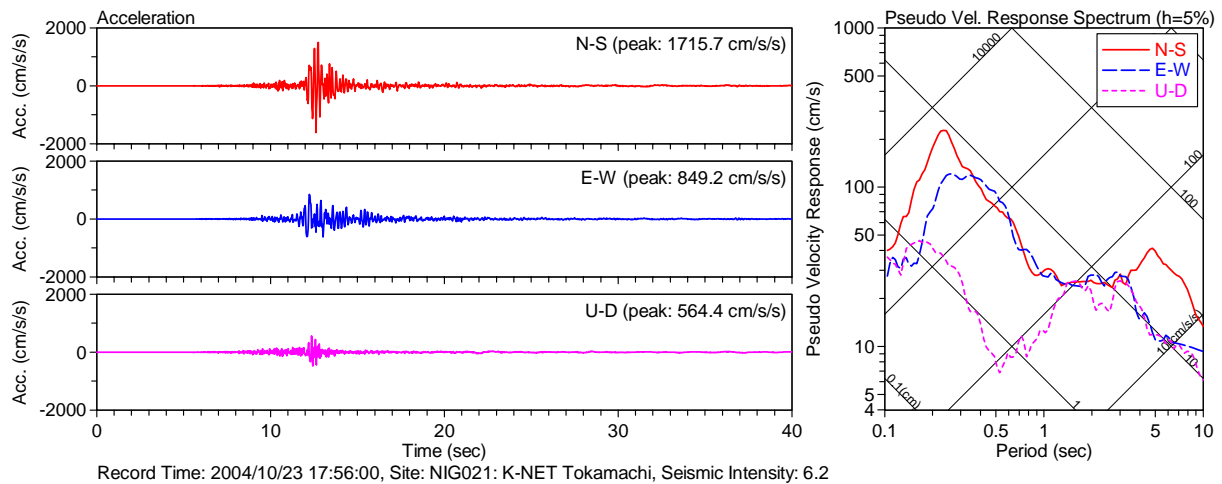
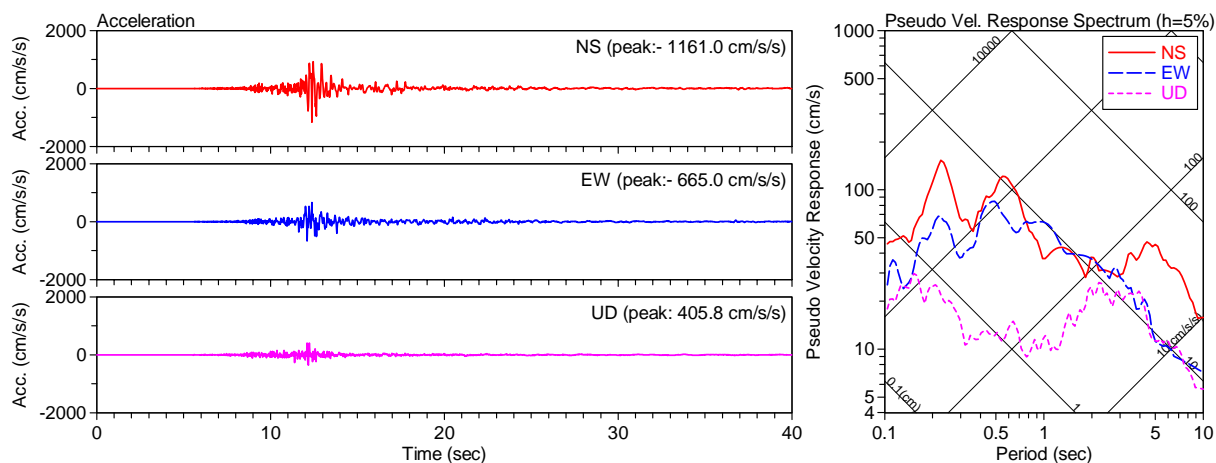


図 3.18 K-NET 十日町 (NIG021) で得られた加速度記録 (左) と 5% 擬似速度応答スペクトル (右)

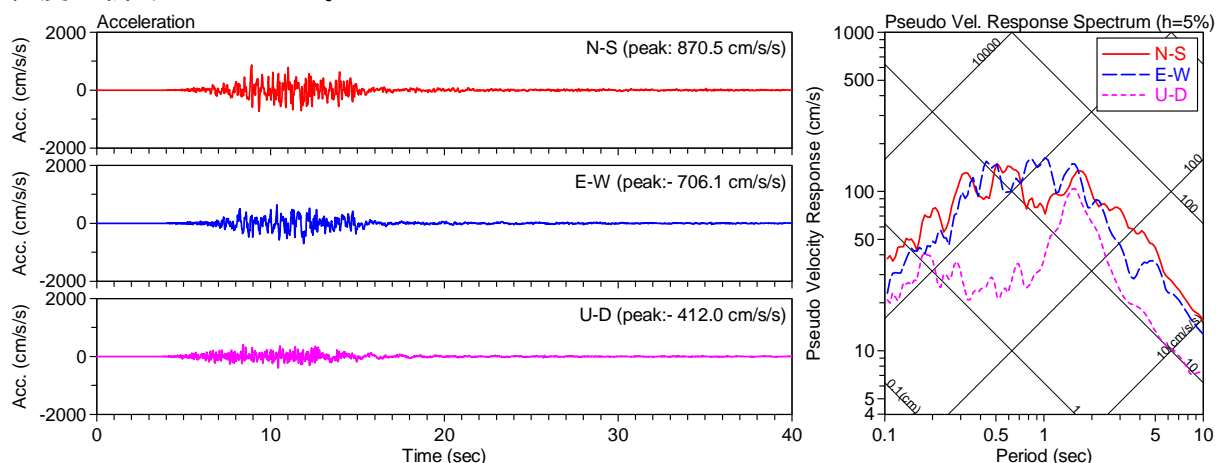


Record Time: 2004/10/23 17:56:00, Site: 65028: Niigata Tokamachi, Seismic Intensity: 5.9

図 3.19 新潟県十日町(65028)で得られた加速度記録(左)と 5%擬似速度応答スペクトル(右)

(4) 長岡市の記録

長岡市内では 3 地点で観測記録が得られている。K-NET 長岡支所(NIG028)は長岡市東部の防災科学技術研究所長岡雪氷防災研究所敷地内に設置されている。また K-NET 長岡(NIG017)は千手小学校の校庭、JMA 長岡は長岡市役所の駐車場に設置されており、両者の距離は近い。それぞれの観測地点で得られた加速度記録と減衰定数 5%の擬似速度応答スペクトルを図 3.20 から図 3.22 に示す。加速度記録を見ると K-NET 長岡(図 3.21)と JMA 長岡(図 3.22)はよく似た波形となっているが、K-NET 長岡支所(図 3.20)は他の 2 つの記録と比べて振幅が大きく、様相が異なる。応答スペクトルも K-NET 長岡支所は 0.3 秒から 3 秒程度の中周期領域が優勢で、速度応答も 100 cm/s を超える大きな値を示している。一方 K-NET 長岡と JMA 長岡の記録の応答スペクトルはよく似た傾向を見せ、スペクトルの平坦な周期領域が 0.2 秒から 5 秒と広がり、応答値は 50 cm/s 程度と低くなっている。



Record Time: 2004/10/23 17:56:00, Site: NIG028: K-NET Nagaoka Branch, Seismic Intensity: 6.1

図 3.20 K-NET 長岡支所(NIG028)で得られた加速度記録(左)と 5%擬似速度応答スペクトル(右)

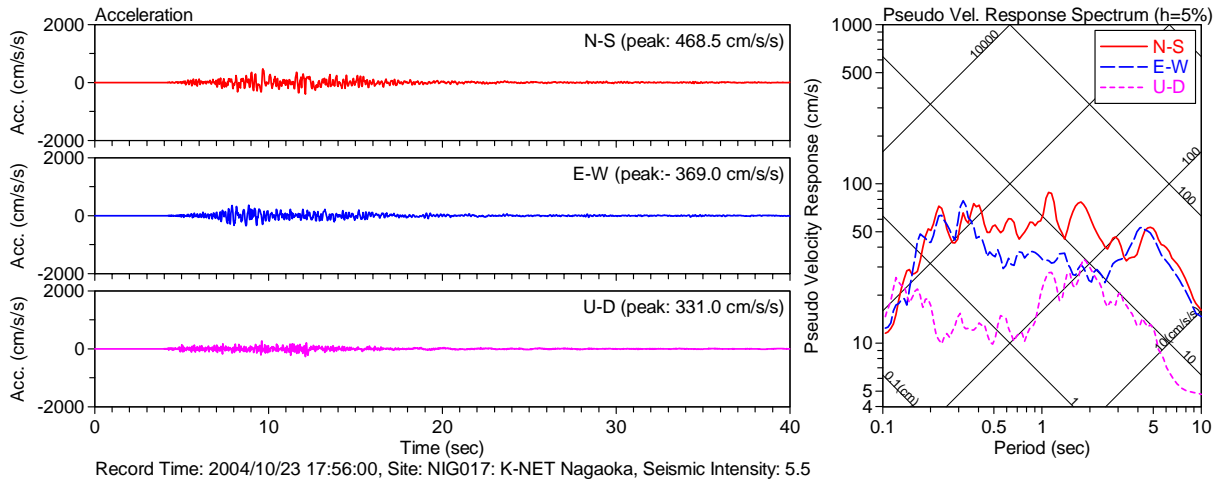


図 3.21 K-NET 長岡(NIG017)で得られた加速度記録(左)と5%擬似速度応答スペクトル(右)

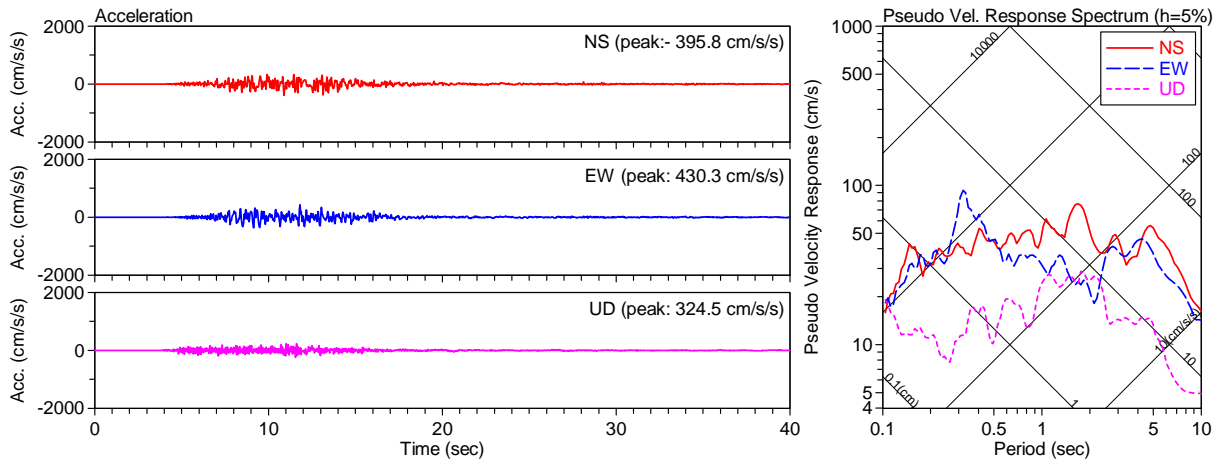


図 3.22 JMA 長岡(JMA530)で得られた加速度記録(左)と5%擬似速度応答スペクトル(右)

3.3.3 既往の記録との比較

前に示したように、2004年新潟県中越地震では気象庁、新潟県を始めとする自治体の震度情報ネットワーク、防災科学技術研究所のK-NETやKiK-netで、被災地域の強震記録が観測された。以下に震源近傍の記録を再度取り上げ、既往の強震記録や設計用に用いられている地震動記録と比較する。

(1) 兵庫県南部地震の記録との比較

図3.23及び図3.24に新潟県川口町、新潟県山古志村及びK-NET小千谷の加速度記録と減衰定数5%の擬似速度応答スペクトルを、1995年兵庫県南部地震で得られたJMA神戸⁶⁾、JR鷹取⁷⁾、及び大阪ガス葺合の記録と比較して示す。いずれの記録も水平2成分のうち最大加速度が大きな成分について応答スペクトルを描いている。0.2秒以下の短周期領域では中越地震の記録が大きくなっているが、0.2秒から1秒の領域では、K-NET小千谷以外の5つの地震動の応答に際立った差は表れない。1秒以上の長周期領域では川口町と山古志村の記録の応答スペクトルは、鷹取や葺合の記録の応答スペクトルと同等の大きさとなっている。中越地震の震源断層の真上の地域では、兵庫県南部地震で被害が大きかった地域と同程度の強さの地震動を受けたと推察される。

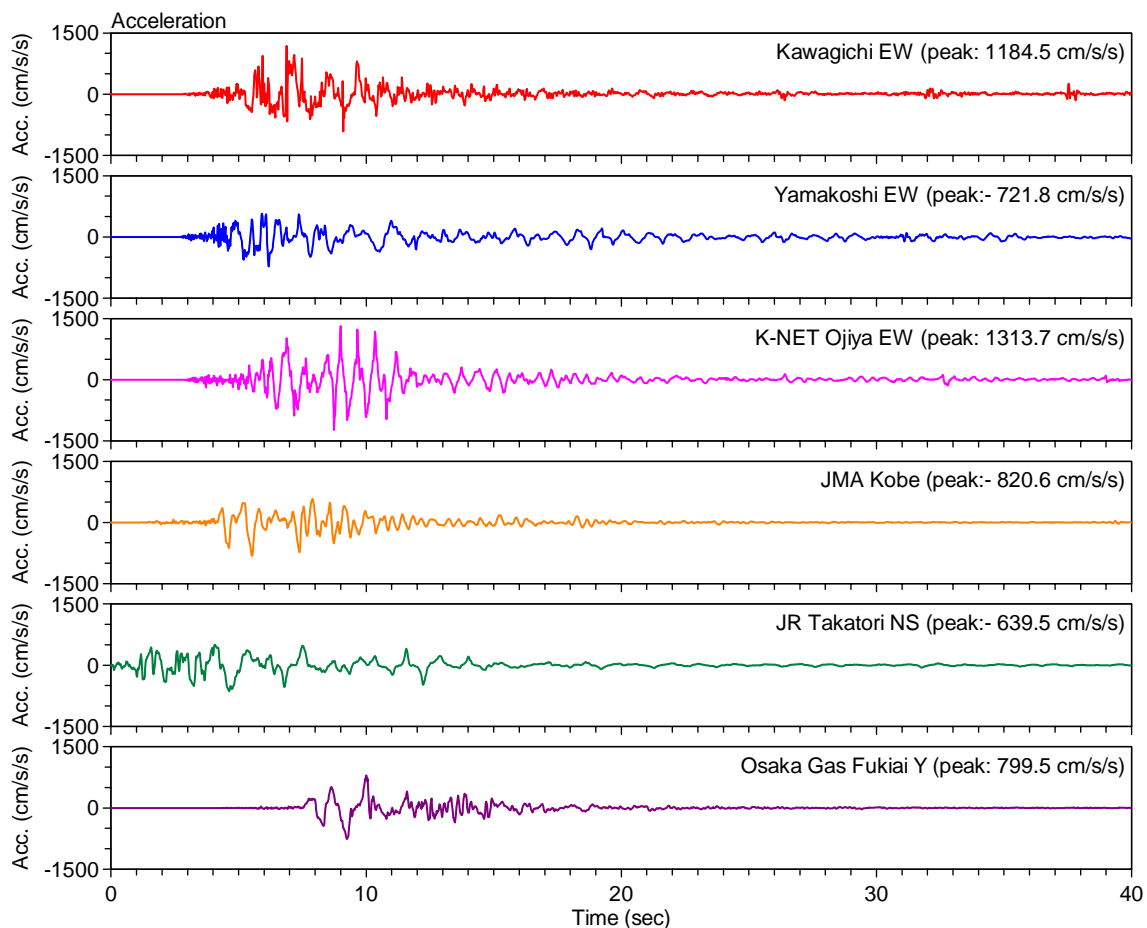


図 3.23 新潟県川口町、新潟県山古志村、K-NET小千谷の記録と1995年兵庫県南部地震の記録(JMA神戸⁶⁾、JR鷹取⁷⁾及び大阪ガス葺合)の加速度記録

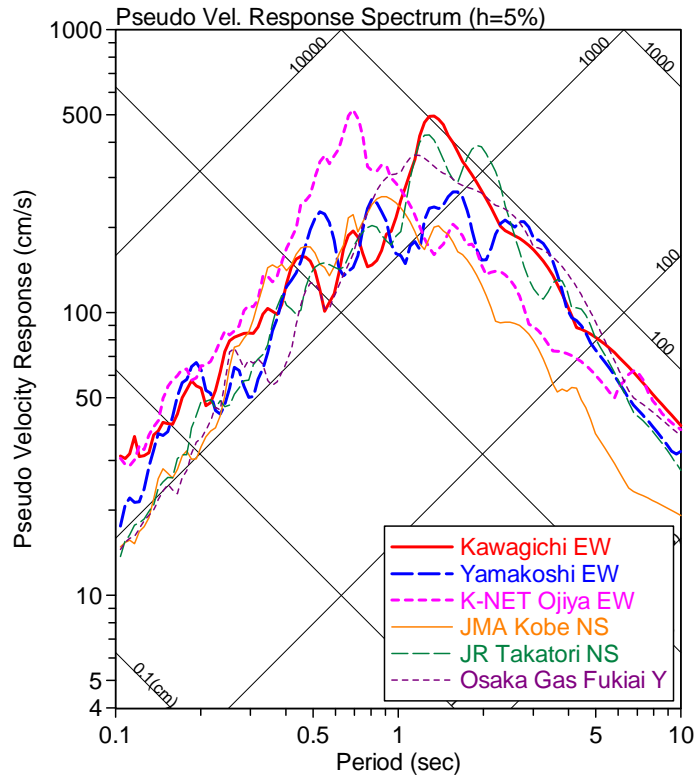


図 3.24 新潟県川口町、新潟県山古志村、K-NET 小千谷の記録と 1995 年兵庫県南部地震の記録(JMA 神戸⁶⁾、JR 鷹取⁷⁾及び大阪ガス葺合)の 5%擬似速度応答スペクトル

(2) 設計用地震動との比較

図 3.25 及び図 3.26 に耐震設計の際に入力地震動としてよく用いられる、El Centro NS、Taft EW、八戸 EW、東北大 NS、及び日本建築センターの設計用入力模擬地震動レベル 2 (BCJ L2)の加速度記録と擬似速度応答スペクトルを、新潟県川口町、新潟県山古志村、K-NET 小千谷の記録を比較して示す。加速度記録は 40 秒間のみ描画しているが、応答スペクトルの計算はオリジナルの記録時間長について行っている。また設計に用いられる観測地震動(El Centro NS、Taft EW、八戸 EW、東北大 NS)は全て最大速度を 50 cm/s に基準化している。

中越地震で観測された地震動は主要動の継続時間は長くはないものの、加速度振幅は設計用地震動のそれを大きく超えている。また応答スペクトルに着目するとほとんどの周期領域で設計用地震動のレベルを上回っている。川口町、山古志村、小千谷市などの震源に近い地域では、設計が想定している地震動の大きさと比較して、極めて厳しい地震動に見舞われたと推察される。

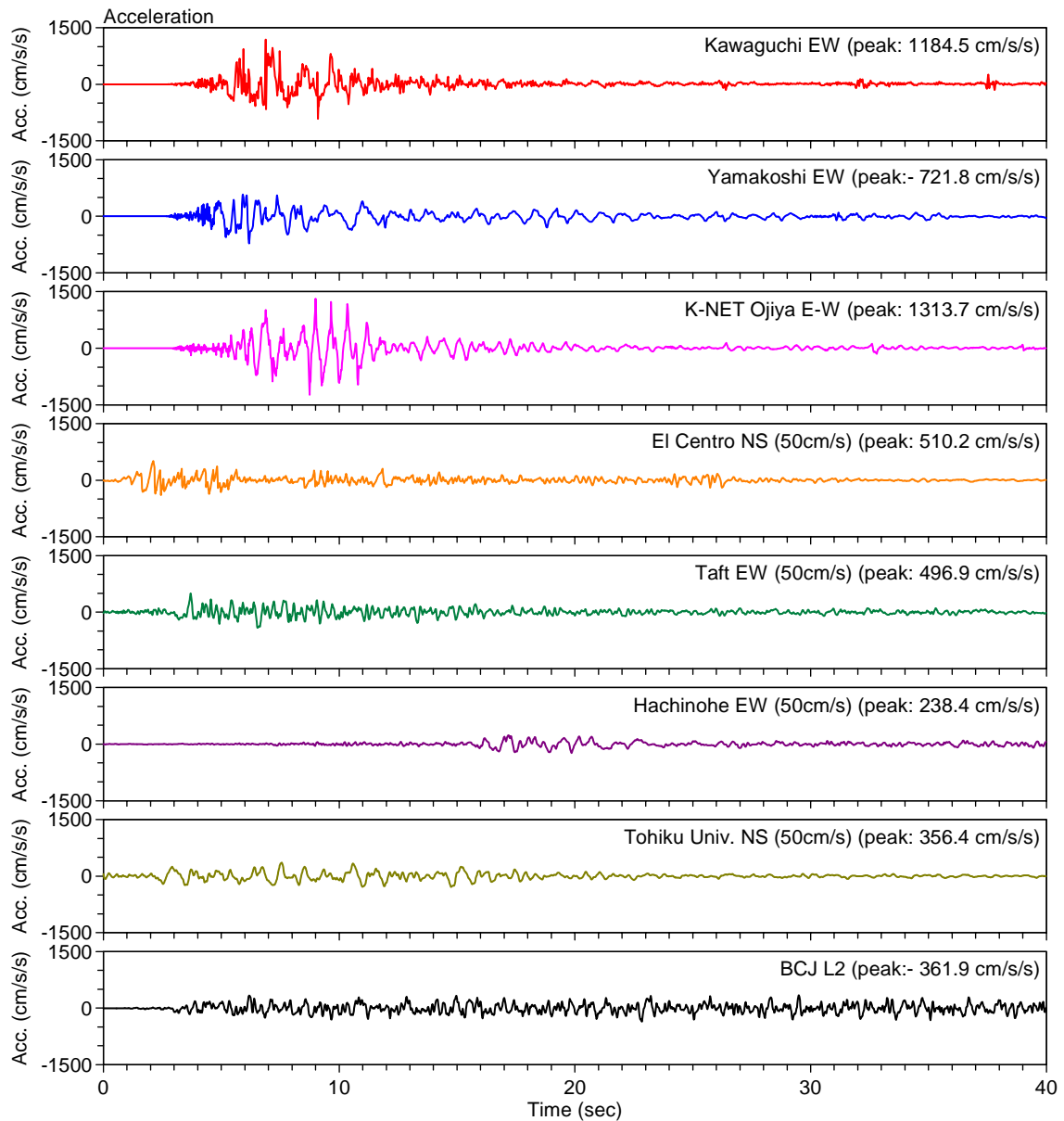


図 3.25 新潟県川口町、新潟県山古志村、K-NET 小千谷の記録と動的設計に用いられる地震動の加速度波形。設計用観測地震動(El Centro NS、Taft EW、八戸 EW 東北大 NS)は最大速度が 50 cm/s となるように基準化。

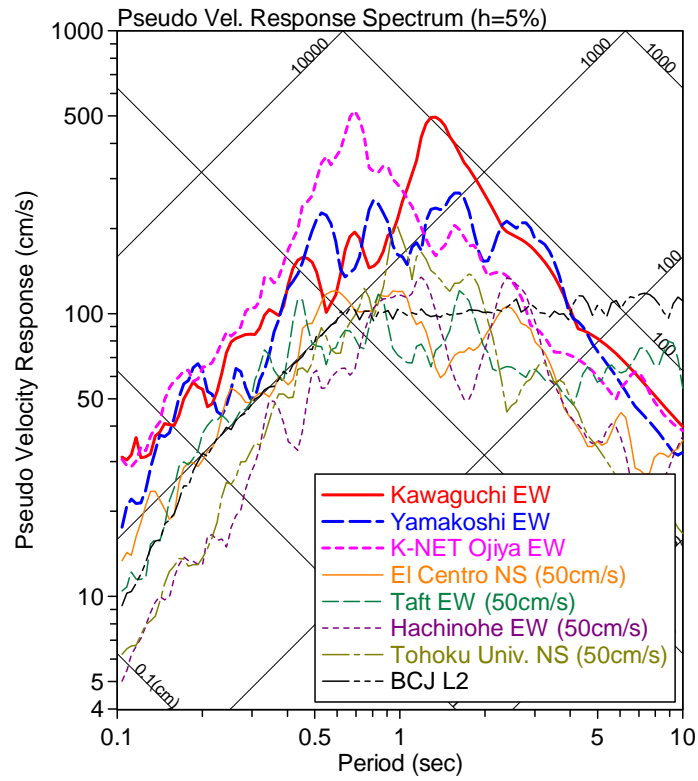


図 3.26 新潟県川口町、新潟県山古志村、K-NET 小千谷の記録と動的設計に用いられる地震動の擬似速度応答スペクトル(h=5%)。設計用観測地震動(El Centro NS、Taft EW、八戸 EW 東北大 NS)は最大速度が 50 cm/s となるように基準化。

3.4 余震観測

3.4.1 余震観測の概要

入力地震動の特性や建物の応答と被害の関係を分析するために、比較的被害の大きかった川口市と小千谷市で余震観測を行った。観測の対象は建物とし、川口町役場、小千谷小学校、及び小千谷市役所の3地点を選定し、計7台の強震計を設置した。11月11日と12日に強震計を設置し、約1ヵ月半の観測を行い、12月27日に撤収した。その間に11月19日及び12月2日から3日にかけての2回のバッテリー交換と記録の回収を行っている。

以下に各観測地点の強震計の設置状況を記す。

(1) 川口町役場

新潟県震度情報ネットワークの川口町の震度計は10月23日17時56分の本震で震度7(計測震度6.5)を観測し、震度計での観測史上最大の値が得られた。震度計は川口町役場の裏側直近に設置されているが、RC造3階建ての庁舎の被害は大きくはなかった。このため将来震度計の記録が入手できれば庁舎建物への入力地震動の検討に利用できると考え、川口町役場庁舎を観測対象として選定した。

余震観測のための強震計の設置状況を表3.3に示す。強震計は2台のAltus Etna(Kinemetrics社製)を用い、1階は庁舎南側の男子更衣室前の廊下に、4階(屋上階)は南側階段室脇の機械室内に設置した。設置方位は庁舎短辺方向(N310°E)としている。

(2) 小千谷小学校

K-NETの小千谷観測地点(NIG019)では、本震で1.3Gを超える最大加速度と6.7に達する計測震度(相当値)が観測された。この観測地点は小千谷小学校及び市民体育館の敷地の端に設置されており、市民体育館は大きな被害を受け、小千谷小学校の被害は軽微であった。地表の観測地点(K-NET 小千谷)が近傍に存在すること、その観測地点の記録は極めて大きな加速度であり建物被害との対応を検討する必要があることから、小千谷小学校を余震観測の対象とした。

強震計の設置状況を表3.4に示す。校舎は3階建てのRC造であり、平面形状はE字型となっている。強震計はAltus K2(Kinemetrics社製)を2台用い、校舎の南側隅角部にある階段室の1階と棟屋(4階相当)に設置した。なおAC電源の確保が困難であったため、自動車用バッテリーを電源とした。

(3) 小千谷市役所

小千谷市役所は小千谷小学校から北北東に1km弱の位置にある4階建てRC造の建物である。中越地震による庁舎の被害は軽微であった。なお気象庁の震度計(JMA 小千谷)が小千谷市役所から300m程度南西方向に離れた小千谷地域広域事務組合消防庁舎裏に設置されている。K-NET 小千谷からも1km足らずの距離と互いに近接しており、地震動の差異と入力地震動の評価に有用と考え、強震計を設置した。

ここではAltus Etnaを1台、SMAC-MDU(アカシ製)強震計に加速度/速度センサーとしてVSE-11/12(東京測振製)を接続したシステムを2台用い、地表に相当する位置

として玄関アプローチ階段下倉庫に Altus Etna を、1 階印刷室と屋上階階段室に SMAC-MDU を設置した。強震計の設置状況を表 3.5 に示す。なお 12 月 2 日の点検時に 1 階に設置した強震計が動作不良となっていたため、地表の Altus Etna を 1 階に移しており、以降地表の記録はない。

表 3.3 川口町役場余震観測状況

名称	川口町役場	記号	KWT
住所	新潟県北魚沼郡川口町大字川口 1974-26	郵便番号	949-7592
緯度経度	37°16'02"N, 138°51'53"E	電話番号	0258-89-3112
機種	Altus Etna 2 台	設置方位	N310°E
設置場所	1 階男子更衣室前(01F), 屋上階機械室(04F)	設置日	2004 年 11 月 11 日
設置状況	  <p>建物位置*(左)と建物外観(右)</p>   <p>1 階男子更衣室前(左:01F)と屋上階機械室(04F)の設置状況</p>		


*地図は国土地理院 25000 数値地図を利用。

表 3.4 小千谷小学校余震観測状況

名称	小千谷小学校	記号	OJP
住所	新潟県小千谷市土川 1-5-1	郵便番号	947-0031
緯度経度	37°18'11"N, 138°47'45"E	電話番号	0258-83-2042
機種	Altus K2 (2台)	設置方位	N230°E
設置場所	1階非常口前(01F), 4階階段室(04F)	設置日	2004年11月12日
設置状況	 <p>建物位置*(左)と建物外観(右: 南東側)</p>  <p>1階非常口前(左:01F)と屋上階階段室(右:04F)の設置状況</p>		

*地図は国土地理院 25000 数値地図を利用。

表 3.5 小千谷市役所余震観測状況

名称	小千谷市役所	記号	OJC
住所	新潟県小千谷市城内 2-7-5	郵便番号	947-8501
緯度経度	37°18'41"N, 138°47'54"E	電話番号	0258-83-3511
機種	Altus Etna (1 台), SMAC-MDU+VSE (2 台)	設置方位	N210°E
設置場所	玄関アプローチ階段下倉庫(GL), 1 階印刷室(01F), 屋上階階段室(05F)	設置日	2004 年 11 月 12 日
設置状況	  <p>建物位置*(左)と建物外観(右: 1 階印刷室 01F は建物裏手)</p>   <p>玄関アプローチ階段下倉庫入口(左)と内部の設置状況(右:GL)</p>   <p>1 階印刷室(左:01F)と屋上階階段室(右:05F)の設置状況</p>		
記事	12/02: 01F の強震計が不調のため撤収し、GL の Etna を 01F へ移設。		

*地図は国土地理院 25000 数値地図を利用。

3.4.2 余震観測記録

余震観測を開始した頃には地震活動は収束に向かっており、観測された余震の最大マグニチュードは4.7とそれほど大きなものではない。しかし余震の数はまだ多く、建築研究所の設置した強震計のいずれかで記録が得られた地震は72に及ぶ。このうち主な記録の最大加速度を表3.6に示す。最大加速度は各測定点の3成分のうち最も大きな値を採っている。表中には比較のため、K-NET 小千谷(NIG019)の最大加速度及び小千谷市にある免震建物⁵⁾(OJB)の基礎上で観測された最大加速度も併せて示す。

表 3.6 余震観測記録一覧

日時	<i>h</i>	<i>M</i>	緯度	経度	KWT		OJP		OJC			NIG 019	OJ B
					01F	04F	01F	04F	GL	01F	05F		
2004/11/11 18:04	7	3.9	37°14.3'N	138°54.3'E	94	141						43	21
2004/11/12 02:24	10	4.3	37°14.1'N	138°56.0'E	59	136						48	19
2004/11/13 10:01	9	4.1	37°09.7'N	138°48.1'E	28	74	18	55	-	10	14	38	15
2004/11/13 14:41	8	3.4	37°12.9'N	138°53.3'E	-	17	13	24	15	9	11		
2004/11/14 06:36	5	2.7	37°15.7'N	138°51.9'E	9	19	20	39	14	6	8		20
2004/11/14 09:28	8	3.1	37°14.7'N	138°57.2'E	17	17	4	14	-	-	5		
2004/11/15 09:39	0	4.7	37°22.3'N	139°00.0'E	17	29	11	31	26	12	25	23	9
2004/11/15 12:40	10	2.8	37°16.1'N	138°57.3'E	13	16	6	12	-	-	-		
2004/11/16 08:35	13	3.1	37°21.7'N	138°51.4'E	-	-	14	29	25	16	17		
2004/11/16 12:09	5	3.5	37°12.1'N	138°48.5'E	12	24	25	44	13	8	8		9
2004/11/19 06:03	10	3.2	37°13.5'N	138°50.5'E	20	33	16	-	20	9	13	27	13
2004/11/24 15:50	6	2.9	37°15.3'N	138°54.0'E	47	53	8	16	-	-	4		11
2004/11/25 20:45	9	2.9	37°15.8'N	138°51.3'E	13	17	18	35	-	-	11		15
2004/11/28 14:03	13	3.8	37°17.4'N	138°51.6'E	18	40	15	21	-	-	14	30	
2004/11/30 08:26	14	3.3	37°16.2'N	138°55.8'E	25	37	5	11	-	-	-		
2004/12/06 07:38	8	3.2	37°13.0'N	138°51.1'E	8	14	6	15	-	-	5		
2004/12/10 16:22	12	3.5	37°17.8'N	138°49.7'E	14	19	19	45	-	25	30	46	23
2004/12/23 21:03	11	4.5	37°23.5'N	138°57.3'E	17	29	-	-	-	15	25	23	9
2004/12/25 10:23	11	4.4	37°24.1'N	138°57.8'E	-	38	-	-	-	23	32	33	11

h は震源深さ(km)、*M* は気象庁マグニチュード、数値は最大加速度、NIG019 は K-NET 小千谷、OJB は免震建物

3.4.3 観測記録の分析

観測記録のうち、全ての強震計が起動した2004年11月15日9時39分の地震の記録(表3.6中太字で記したもの)について考察を加える。なおこの地震はマグニチュードが4.7と観測期間中最大の規模である。

(1) 川口町役場

川口町役場で得られた余震記録を図 3.27 に、そのフーリエスペクトルを図 3.28 に、1 階の記録に対する 4 階の記録のフーリエスペクトル比を図 3.29 に示す。なお以下のフーリエスペクトル及びフーリエスペクトル比は主要動部分 40 秒間の記録に対し算出し、バンド幅 0.2 Hz の Parzen Window で平滑化している。また横軸は周期としている。凡例の”310”は上から見て北から時計回りに 310 度の方向を表し、建物の短辺方向に相当する(表 3.3 参照)。”040”は長辺方向である。4 階で得られた記録の最大加速度は 1 階の記録の 1.5 倍程度となっている。フーリエスペクトル比に着目すると、庁舎の固有周期は両方向とも 0.25 秒前後と推察される。なお 1 階の記録から算出した計測震度は 2.4 であった。

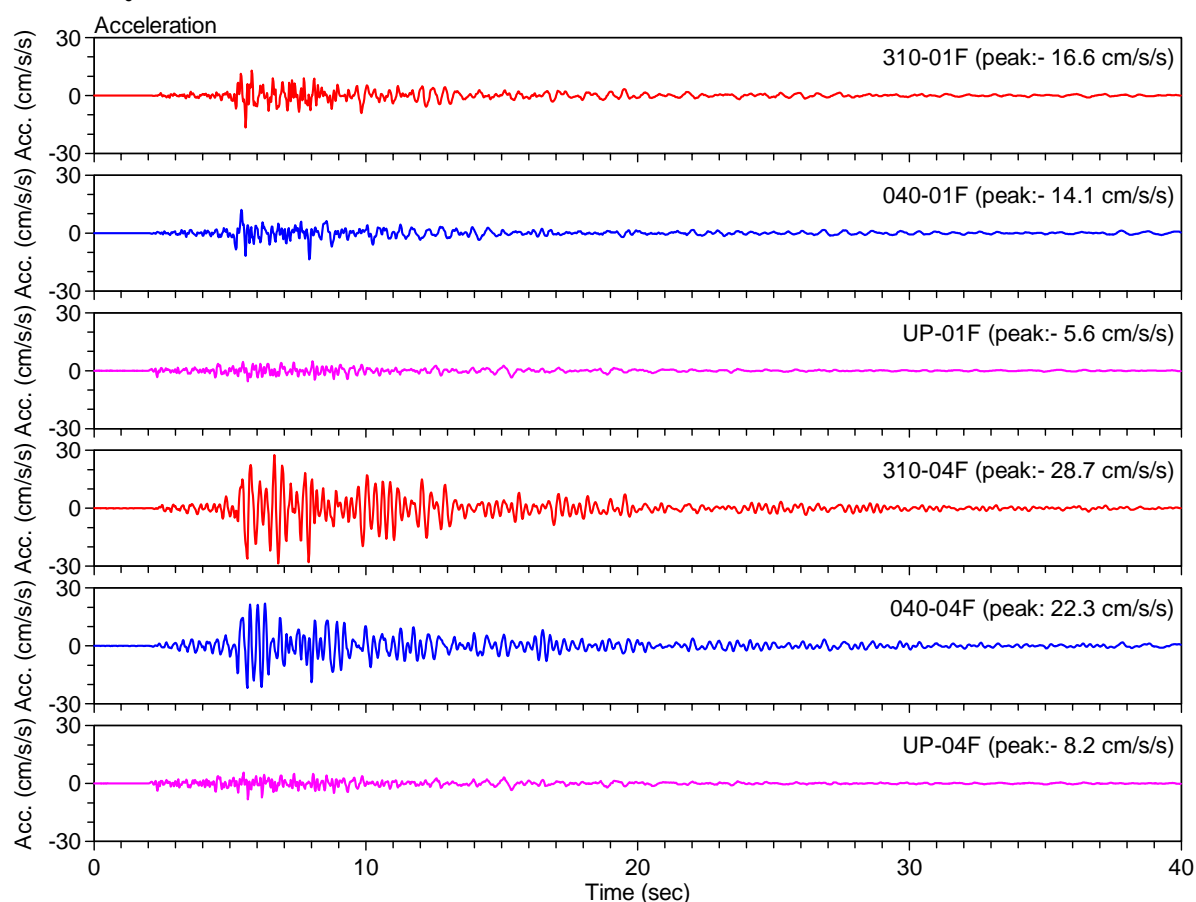


図 3.27 川口町役場(KWT)で得られた余震記録。3 成分毎に上段が 1 階、下段が 4 階(R 階)

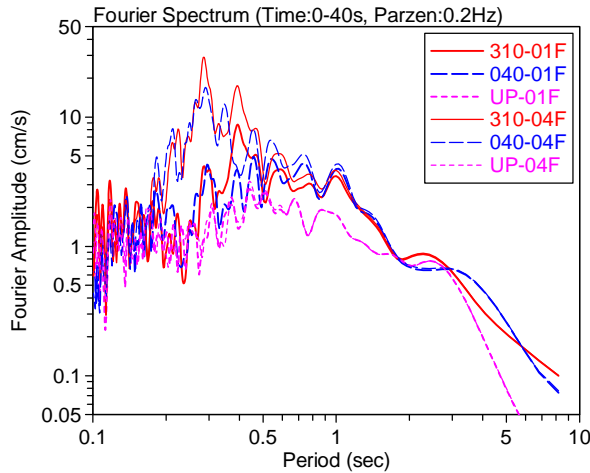


図 3.28 川口町役場(KWT)で得られた余震記録のフーリエスペクトル

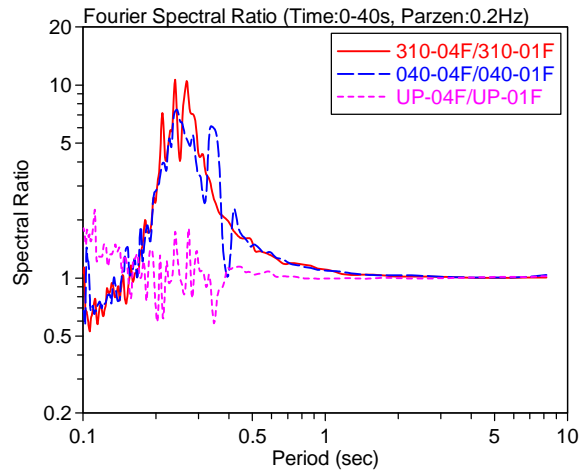


図 3.29 川口町役場(KWT)の記録のフーリエスペクトル比(4F/1F)

(2) 小千谷小学校

図 3.30 は小千谷小学校で得られた余震記録、図 3.31 はそのフーリエスペクトル、図 3.32 は 1 階の記録に対する 4 階の記録のフーリエスペクトル比である。川口町役場の場合と同様に凡例の数値は方位を表す(表 2.2 参照)。小千谷小学校では 4 階で得られた記録の最大加速度は 1 階の記録の約 3 倍と大きく増幅されている。またフーリエスペクトル比から推定される校舎の固有周期は 0.18 秒から 0.2 秒程度と同じ階数の川口町役場に比して短めとなっている。1 階の記録から算出した計測震度は 2.1 となっている。

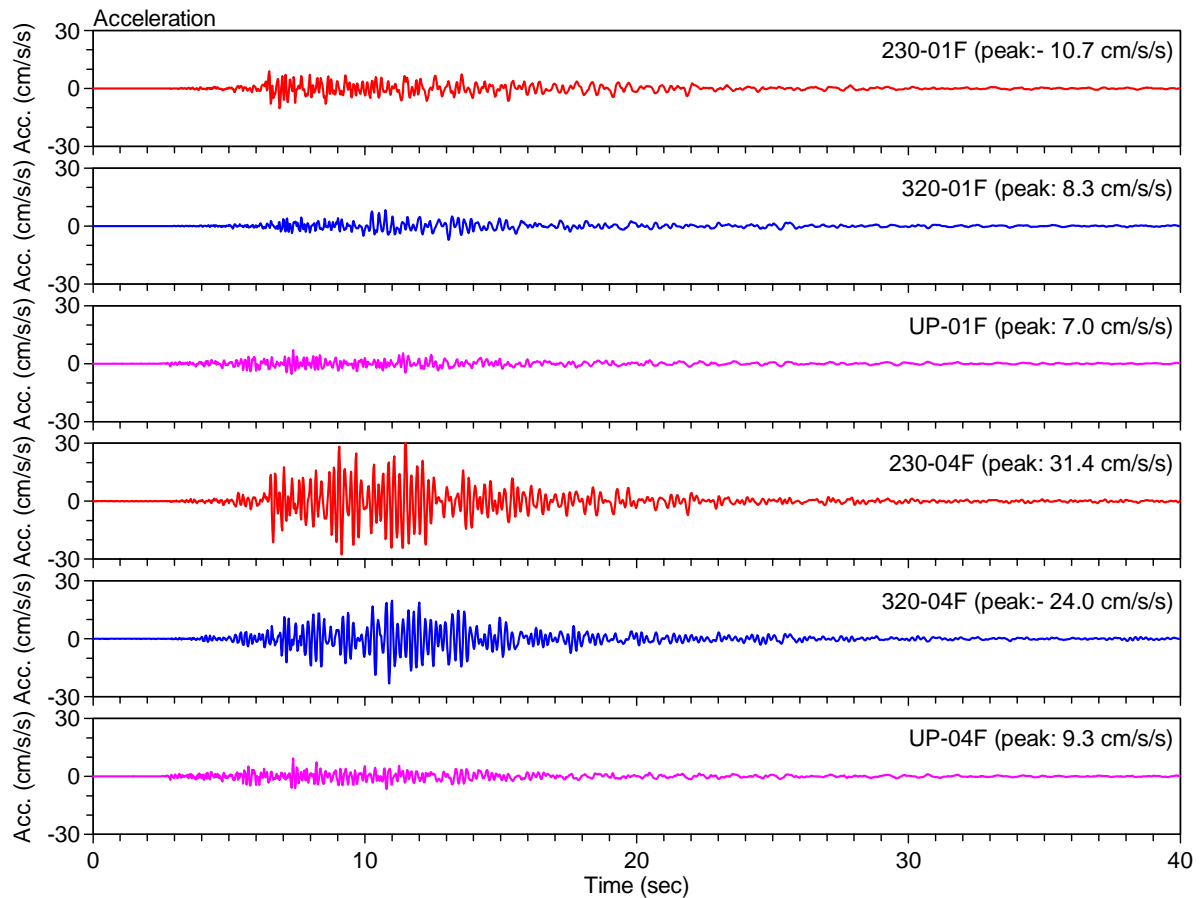


図 3.30 小千谷小学校(OJP)で得られた余震記録。3 成分毎に上段が 1 階、下段が 4 階

(R 階)

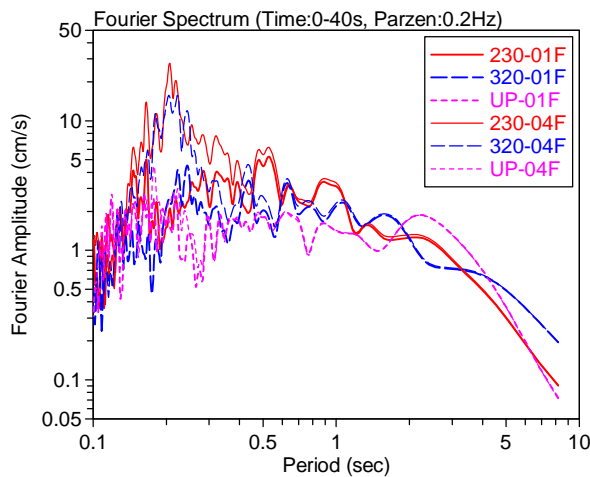


図 3.31 小千谷小学校(OJP)で得られた余震記録のフーリエスペクトル

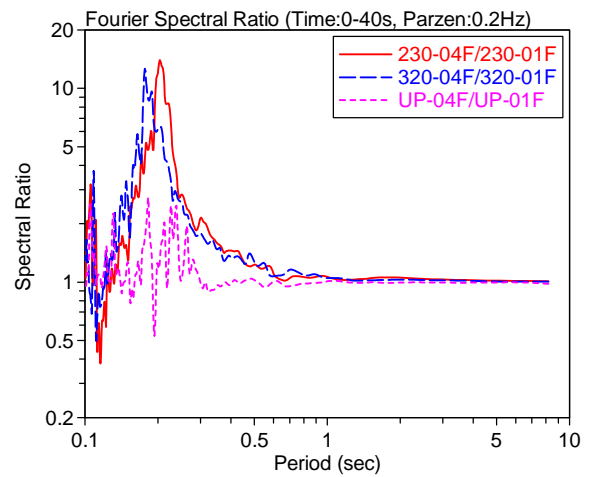


図 3.32 小千谷小学校(OJP)の記録のフーリエスペクトル比(4F/1F)

(3) 小千谷市役所

小千谷市役所で得られた余震記録を図 3.33 に示す。3 成分毎に上段から地表(GL)、建物 1 階(1F)、建物 5 階(5F)と並んでいる。凡例の数値は方位を表す(表 3.5 参照)。地表の記録から算出した計測震度は 2.7(1 階の記録からは 2.2)である。水平成分の加速度振幅は、1 階は地表の半分に、5 階は 1 階の 2 倍程度になっている。

またこれらの記録のフーリエスペクトルを図 3.34 に、5 階の地表に対するフーリエスペクトル比(5F/GL)を図 3.35 に、5 階の 1 階に対するフーリエスペクトル比(5F/1F)を図 3.36 に、1 階の地表に対するフーリエスペクトル比(1F/GL)を図 3.37 に示す。5F/GL のフーリエスペクトル比(図 3.35)では 0.42 秒辺りに、5F/1F のフーリエスペクトル(図 3.36)では 0.40 秒辺りにピークが見られる。前者が建物と地盤の相互作用のスウェイとロッキングを含んだ固有周期に、後者がロッキングを含んだ固有周期に対応する。即ちスウェイの影響によって固有周期が 5%程度伸びている。1F/GL のフーリエスペクトル比(図 3.37)は、相互作用効果による入力損失と考えることができる。0.15 秒から 0.4 秒の領域でスペクトル比が低下しており、0.5 秒より長い周期領域ではほぼ 1 となっている。短周期領域での入力の損失が認められ、これが最大加速度の差異にも表れている。

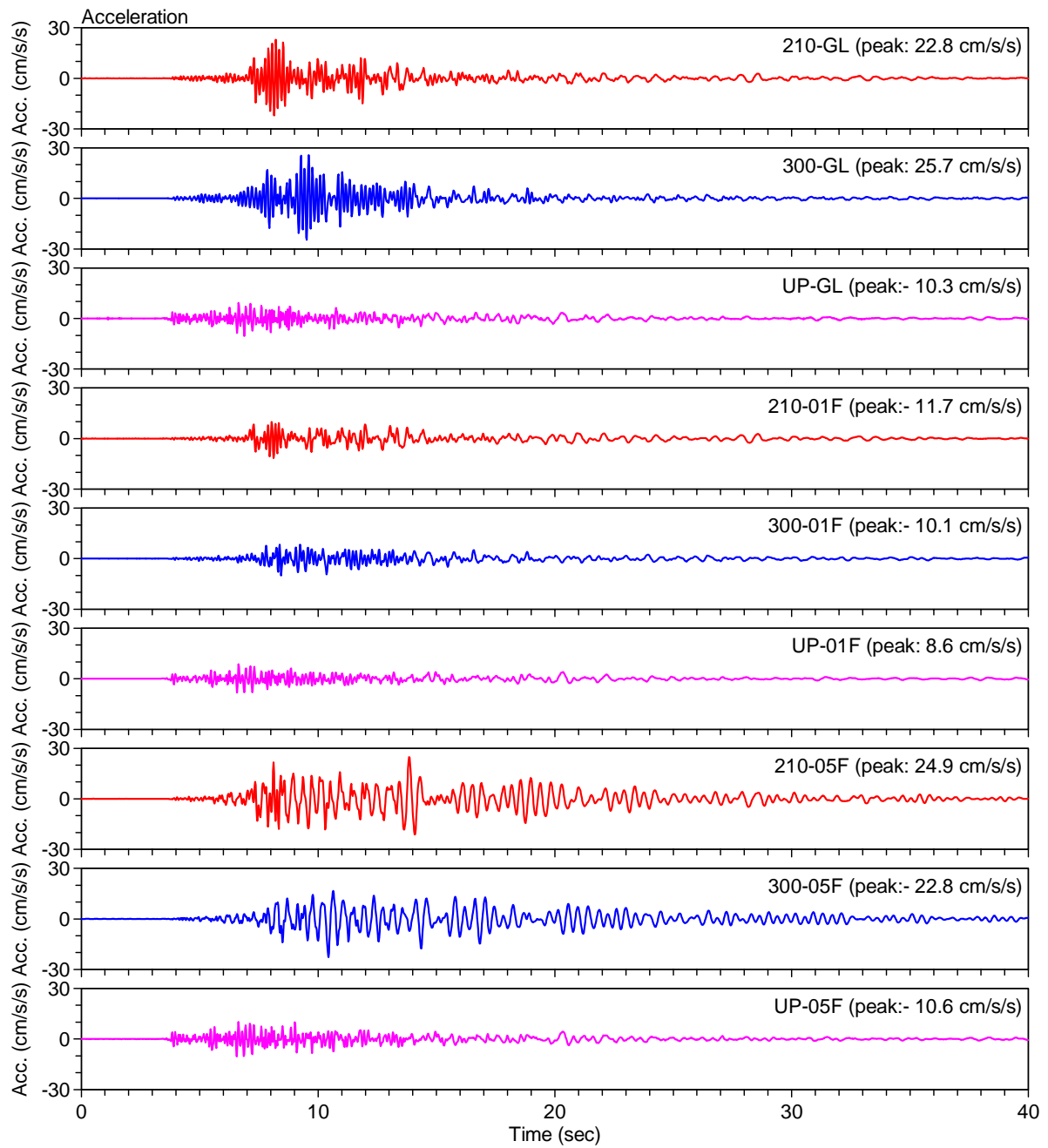


図 3.33 小千谷市役所(OJC)で得られた余震記録。3 成分毎に上段が地表、中段が 1 階、下段が 5 階(R 階)

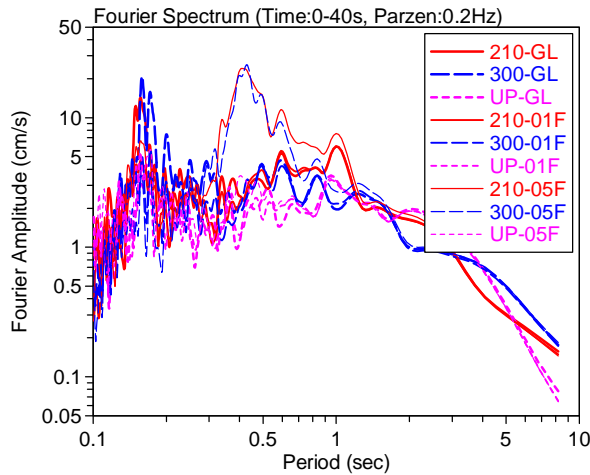


図 3.34 小千谷市役所(OJC)で得られた余震記録のフーリエスペクトル

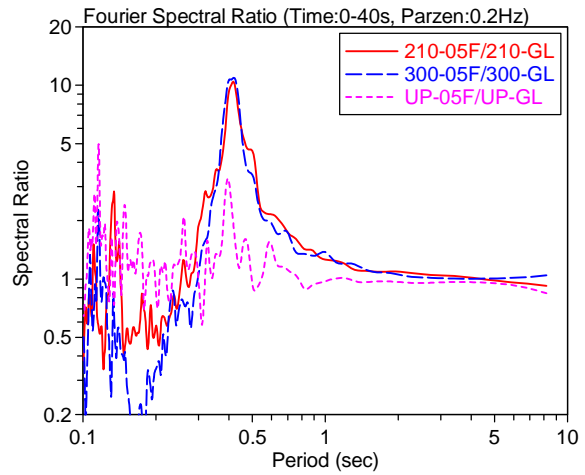


図 3.35 小千谷市役所(OJC)の記録のフーリエスペクトル比(5F/GL)

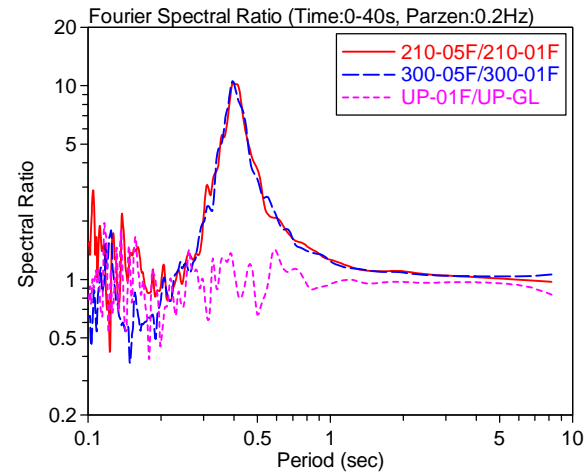


図 3.36 小千谷市役所(OJC)の記録のフーリエスペクトル比(5F/1F)

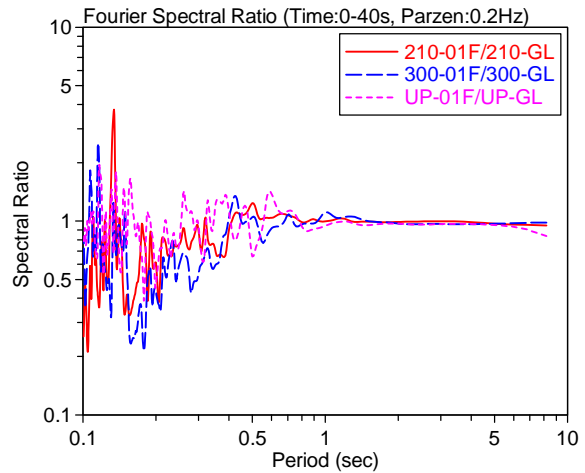


図 3.37 小千谷市役所(OJC)の記録のフーリエスペクトル比(1F/GL)

(4) K-NET 小千谷と小千谷小学校 1F の記録の比較

前述したように小千谷小学校の近傍に K-NET 小千谷観測地点(NIG019)が設置されている。以下に K-NET 小千谷の記録(地盤上に相当)と小千谷小学校 1 階の記録を比較する。なお 1 階の強震計は建物の軸に合わせて設置されているが、以下の比較では K-NET に合わせて NS、EW に変換している。図 3.38 に両者の記録を比較して示す。上段が K-NET、下段が小千谷小学校 1 階の記録である。加速度波形上には大きな差異が認められ、K-NET の水平成分の最大加速度は 3 倍程度大きい。図 3.39 はそれら記録のフーリエスペクトル、図 3.40 は地表(K-NET)の記録に対する 1 階の記録のフーリエスペクトル比である。長周期領域では概ね同レベルであるが、0.2 秒から 0.5 秒の周期領域で水平成分のスペクトル比は大きく落ち込んでいる。地震動の強さと被害との関係を探る上で重要な現象であり、局地的な地盤増幅と入力損失の両面から検討が必要である。

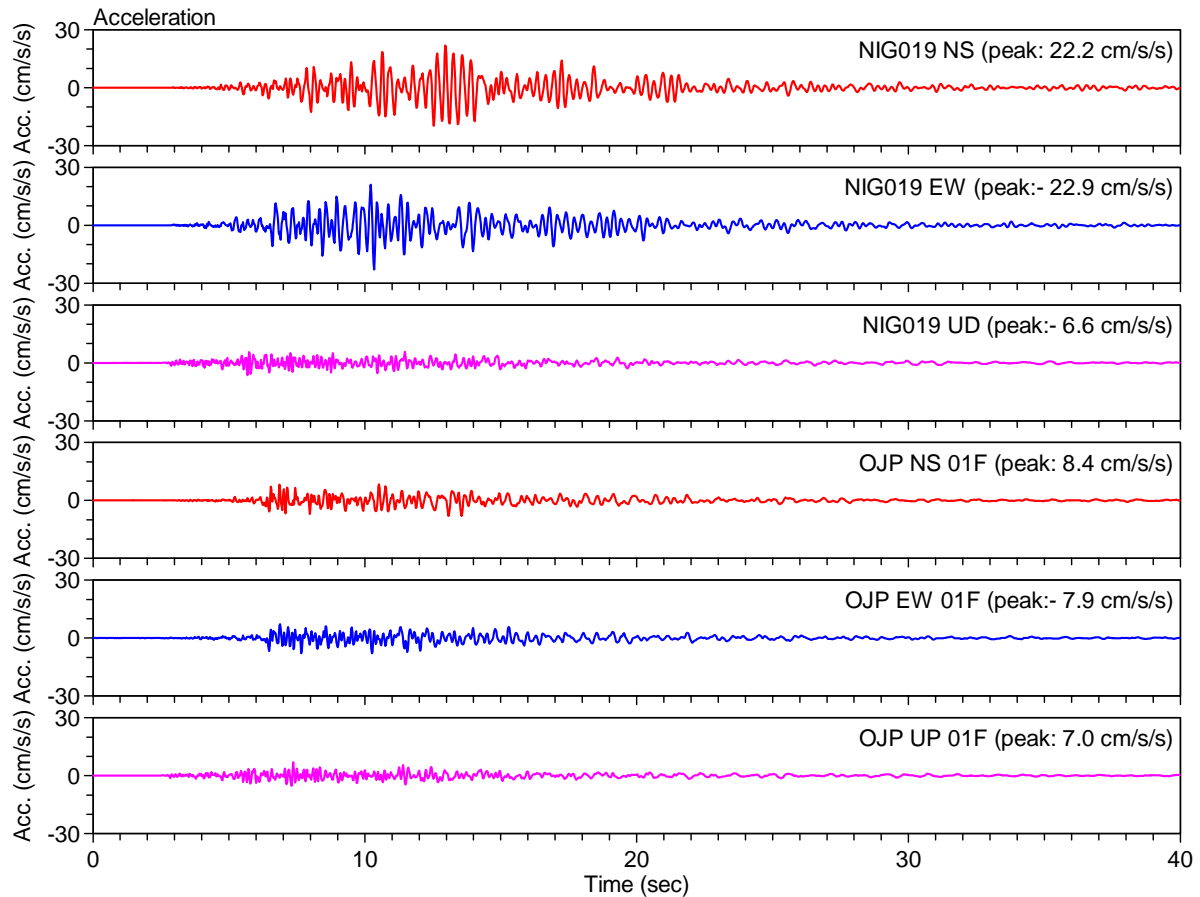


図 3.38 K-NET 小千谷(NIG019: 上段)と小千谷小学校(OJP: 下段)の記録の比較

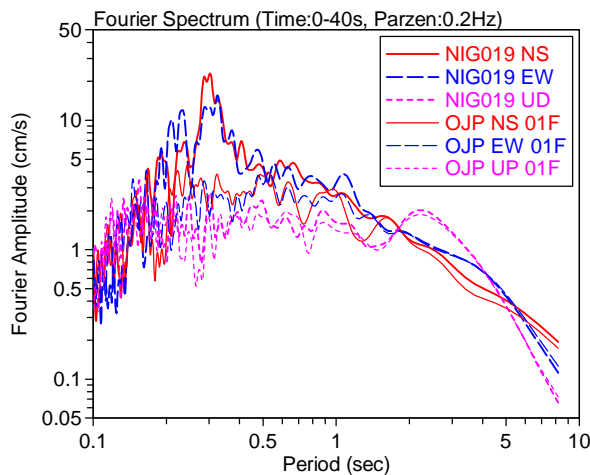


図 3.39 K-NET 小千谷と小千谷小学校の記録のフーリエスペクトル

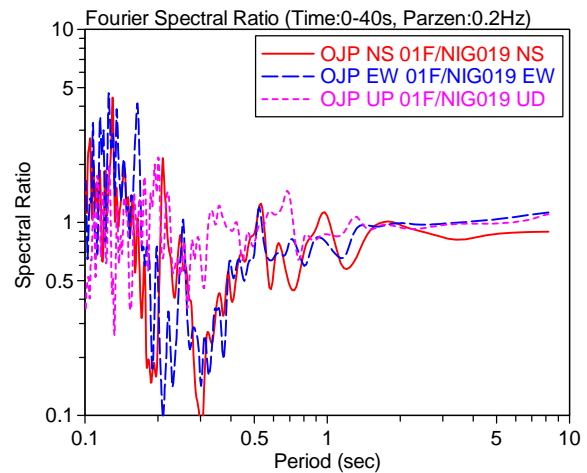


図 3.40 小千谷小学校 1 階/K-NET 小千谷 (1F/GL)のフーリエスペクトル比

(5) 小千谷小学校 1 階、小千谷市役所 1 階及び免震建物基礎上の記録の比較

小千谷市内の免震建物（図 3.12）ではその竣工以来強震観測が行われており、ここで検討対象としている 11 月 15 日の余震の記録も得られている。ここでは建物への入力としてどの程度の差異があるかを検討するために、小千谷小学校 1 階、小千谷市役所 1 階、及び免震建物基礎上(免震ピット内)の記録を比較する。

図 3.41 はそれぞれの観測地点で得られた加速度記録である。3 成分毎に上段が小千

谷小学校 1 階、中段が小千谷市役所 1 階、下段が免震建物基礎上の記録である。また比較のため小千谷小学校と小千谷市役所の記録は NS、EW に変換している。水平最大加速度は 7 cm/s^2 から 11 cm/s^2 、鉛直最大加速度が 7 cm/s^2 から 9 cm/s^2 と大きな差はなく、波形も良く似た形状を示している。

各記録のフーリエスペクトルを図 3.42～図 3.44 に示す。細かな起伏に違いがあるが、全体的な形状は共通で、振幅の値も同程度である。図 3.45～図 3.47 に小千谷市役所 1 階/小千谷小学校 1 階、免震建物/小千谷小学校 1 階、免震建物/小千谷市役所 1 階のフーリエスペクトル比を示す。いずれのスペクトル比にも少なからず起伏があり、フーリエスペクトル上で最大 2 倍程度の差異があるが、平均的に見れば 1 程度の値となっている。短周期側の山谷には上部構造の影響(小千谷小学校で 0.2 秒辺り、小千谷市役所で 0.4 秒辺り)も含まれており、フーリエスペクトル比が直接入力地震動の差異を表しているわけではないことに留意すれば、この 3 つの建物の入力地震動のレベルに大差がないと判断できる。本震時には地盤や建物の非線形性など更に考慮すべき項目は増えるが、これらの建物の入力地震動に大きな差があったとは考え難い。

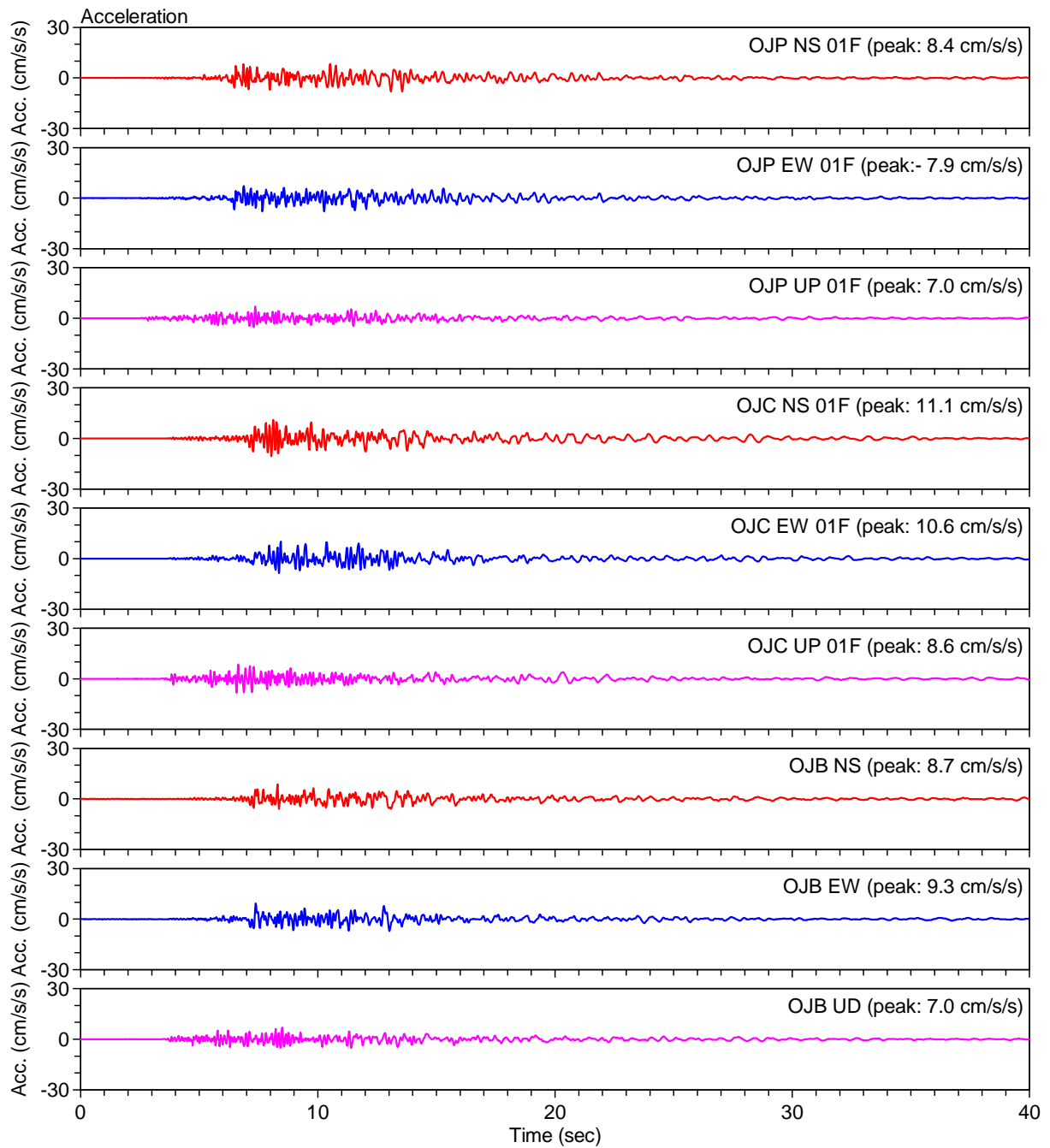


図 3.41 建物内で得られた余震記録。3 成分毎に上段が小千谷小学校(OJP)1 階、中段が小千谷市役所(OJC)1 階、下段が免震建物(OJB)

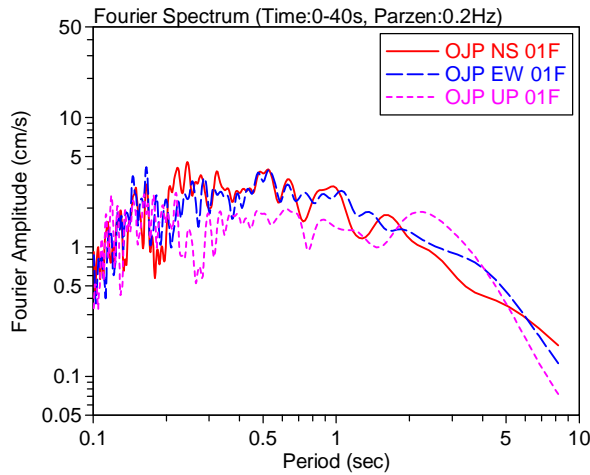


図 3.42 小千谷小学校 1 階の記録のフーリエスペクトル

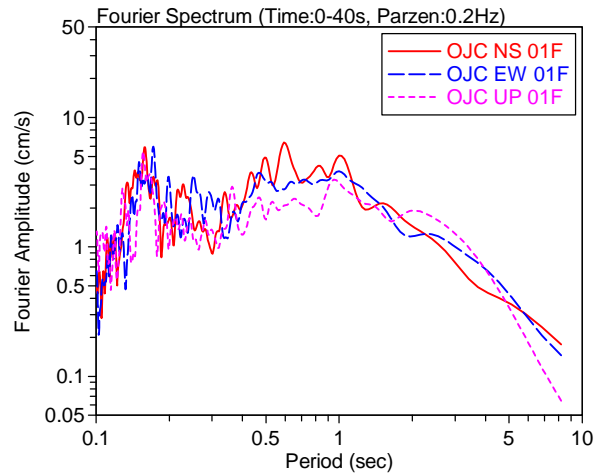


図 3.43 小千谷市役所 1 階の記録のフーリエスペクトル

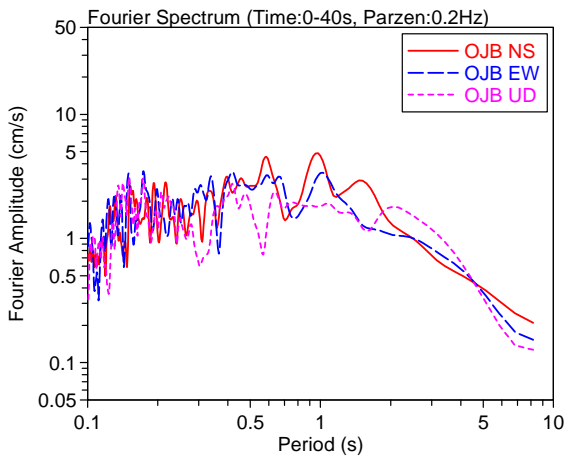


図 3.44 免震建物の記録のフーリエスペクトル

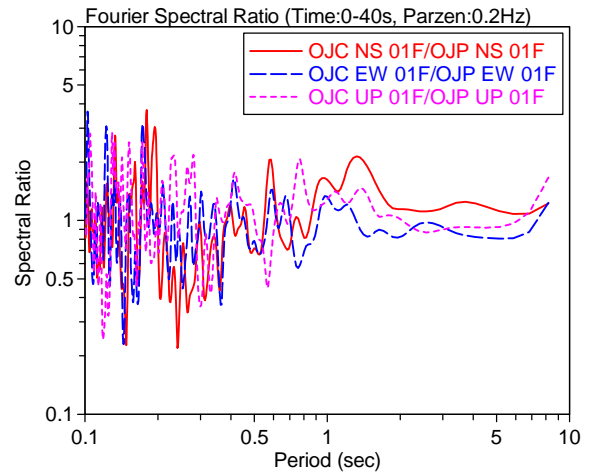


図 3.45 小千谷市役所 1 階/小千谷小学校 1 階のフーリエスペクトル比

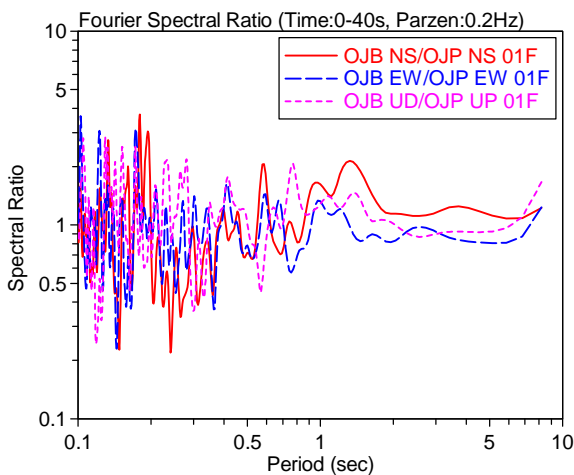


図 3.46 免震建物/小千谷小学校 1 階のフーリエスペクトル比

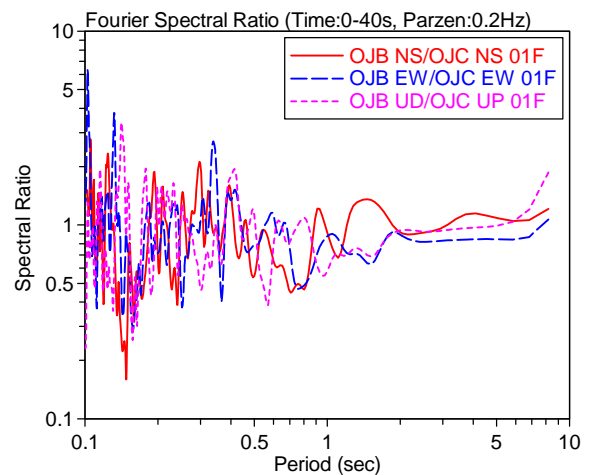


図 3.47 免震建物/小千谷市役所 1 階のフーリエスペクトル比

謝辞

本報告の中で用いた K-NET の記録は防災科学技術研究所のウェブサイト³⁾からダウンロードしたものである。また気象庁の計測震度計及び新潟県の震度情報ネットワークの記録は気象庁のウェブサイト¹⁾または気象庁が編集し、気象業務支援センターが頒布している CD-ROM²⁾に収録されているものである。一方、小千谷市の免震建物(OJB)の強震記録は株式会社三菱地所設計から提供を受けたものである。ここに記して関係諸氏に深く謝意を表す。

参考文献と URL

- 1) 気象庁：平成 16 年(2004 年)新潟県中越地震に関する各種資料等，
http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2004_10_23_niigata/
- 2) 気象庁：強震波形データ(95 型) 2004 年，気象業務支援センター
- 3) 防災科学技術研究所：K-NET, <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 4) 防災科学技術研究所：KiK-net, <http://www.kik.bosai.go.jp/>
- 5) 溜正俊，鴫田隆：免震建物の地震観測記録と振動解析結果，平成 16 年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集，日本地震工学会，2004 年 12 月
- 6) 気象庁：強震波形データ(87 型) 1993 年~1997 年 3 月，気象業務支援センター
- 7) 中村豊，上半文昭，井上英司：1995 年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II)，JR 地震情報，No.23d, 1996 年

3.4.3 強震記録による構造物の非線形応答性状

(1) 要求曲線による比較

限界耐力計算で規定される要求曲線(Sa-Sd 曲線)を用いて、地震動と被害の関係を検討する。今回用いている強震記録は、すべて地盤上での記録であるが、ここでの検討は、これらの強震動がそのまま構造物に入力していたらどのような応答(被害)になっていたかを推定するものである。実際の構造物被害を説明するためには、個々の構造物の入力条件を加味した入力地震動の評価が必要である。

図 3.48 および図 3.49 に減衰定数 5% および 10% での十日町 NS、小千谷 EW、長岡支所 NS、小出 NS、および JMA 小千谷各記録の要求曲線を示す。図中には弾性周期 0.3sec、Ds=0.5 での履歴曲線を併せて示している。更に、ヘアークラック等による初期の剛性低下を考慮して、剛性低下率 50% での履歴を示している。

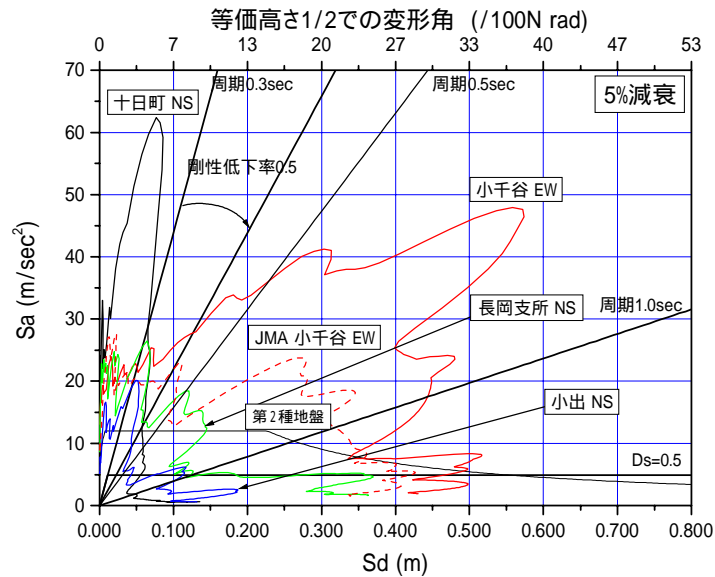


図 3.48 5%減衰での要求曲線の比較

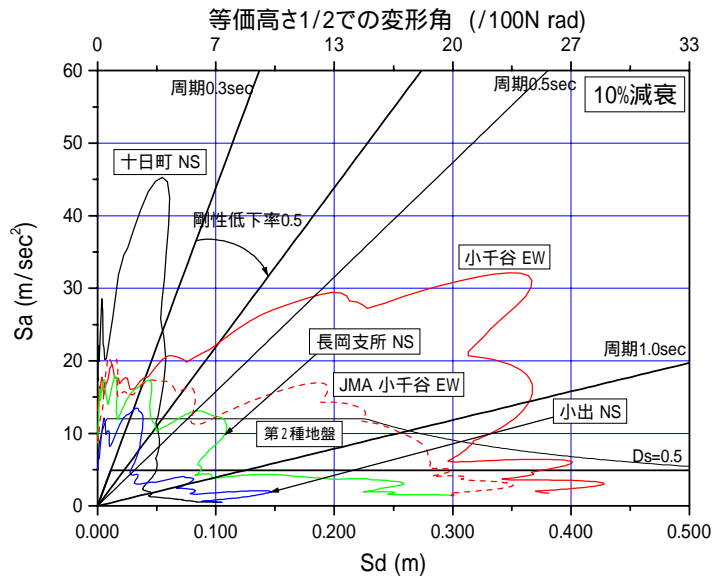


図 3.49 10%減衰での要求曲線の比較

(2) エネルギースペクトルによる検討

図 3.50 に十日町 NS、小千谷 EW、長岡支所 NS、および小出 NS の入力エネルギー速度換算値 ($V_E = \sqrt{\int \ddot{x}_0 \cdot \dot{x} dt}$) を示す。継続時間は、主要動部分の 100 秒を用いた。また、弾性応答によるエネルギー吸収量は、

$$\frac{1}{2}(M \cdot C_B \cdot G) \cdot \delta_y = \frac{1}{2}(M \cdot C_B \cdot G) \cdot \frac{(M \cdot C_B \cdot G)}{K} = \frac{1}{2} M \cdot \frac{M}{K} \cdot (C_B \cdot G)^2$$

で計算される。ここで、M:総質量、 C_B :ベースシアー係数、G:重力加速度、 δ_y :降伏変位、K:建物剛性、である。

このエネルギーの速度換算値は、

$$\frac{1}{2} M \cdot V^2 = \frac{1}{2} M \cdot \frac{M}{K} \cdot (C_B \cdot G)^2$$

より、

$$V = C_B \cdot G \cdot \sqrt{\frac{M}{K}} = \frac{C_B \cdot G}{2\pi} \cdot T$$

となる。ここで、T は建物固有周期である。

図中に $C_B=1.0$ 、0.5、0.3 での弾性応答の吸収するエネルギーを併せて示す。 V_E が各線を上回る場合は、その差分は塑性化によりエネルギー消費されると考えられる。逆に下回る場合は、建物応答は弾性に収まると考えられる。

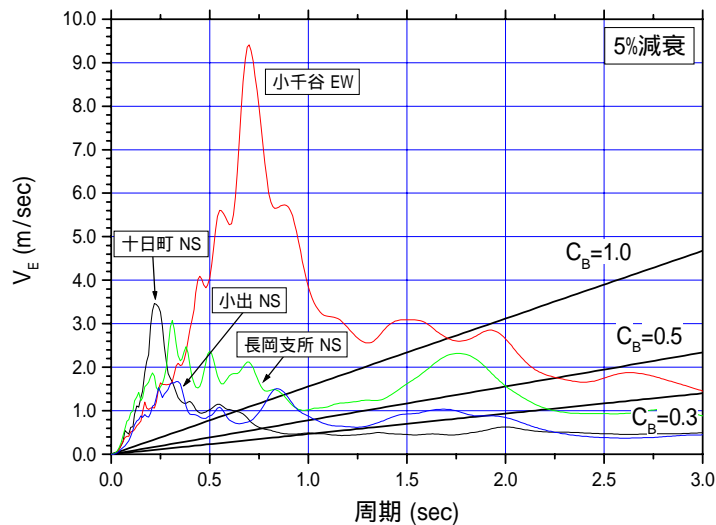


図 3.50 主要 4 波の入力エネルギー速度換算値

(3) 弾塑性地震応答解析による検討

K-net 小千谷 EW 成分を対象に、 $C_B=1.0$ 、 0.5 、 0.3 の 3 種類の建物について弾塑性地震応答解析を行った。解析では以下の仮定を用いた。

- ・ 復元力特性は武田モデル
- ・ ひび割れ耐力(F_c)は降伏耐力(F_y)の $1/3$
- ・ 降伏時剛性低下率は 0.5
- ・ 降伏後剛性は初期剛性の $1/1000$
- ・ 減衰は瞬間剛性比例型減衰で 5%
- ・ 建物重量は 980tonf

弾性周期 0.3sec での解析パラメータを表 3.8 に示す。また、各ケースでのせん断力 - 水平変形関係を図 3.51 に示す。最大塑性率は $C_B=1.0$ で 5.0 、 $C_B=0.5$ で 14.1 、 $C_B=0.3$ で 30.0 であった。

同様に、弾性周期 0.5sec に対して、表 3.8 表 に示すように同じく $C_B=1.0$ 、 0.5 、 0.3 の 3 種類の建物について弾塑性地震応答解析を行った。各ケースでのせん断力 - 水平変形関係を図 3.52 に示す。最大塑性率は $C_B=1.0$ で 2.4 、 $C_B=0.5$ で 6.6 、 $C_B=0.3$ で 12.3 であった。弾性周期 0.3sec に比べて応答は非常に小さくなっている。

以上のように、弾塑性解析を実施した結果、小千谷 EW 波では、弾性周期 0.3sec 程度および 0.5sec 程度の建物共に D_s が 0.5 以下では塑性率 4 を超える大きな応答値を生じた。

また、応答塑性率がほぼ 1 となるための入力地震動レベルを表 3.9 に示す。表から、建物の応答塑性率がほぼ 1 以下となるためには、原波形を 50% 以下に低減する必要があることが分かる。

表 3.7 解析パラメータ (T=0.3)

		解析ケース		
		Case 1 ($C_B=1.0$)	Case 2 ($C_B=0.5$)	Case 3 ($C_B=0.3$)
耐力 (kN)	Fc	3201.33	1600.67	960.40
	Fy	9604.00	4802.00	2881.20
変形 (mm)	Dc	7.45	3.72	2.23
	Dy	44.68	22.34	13.40

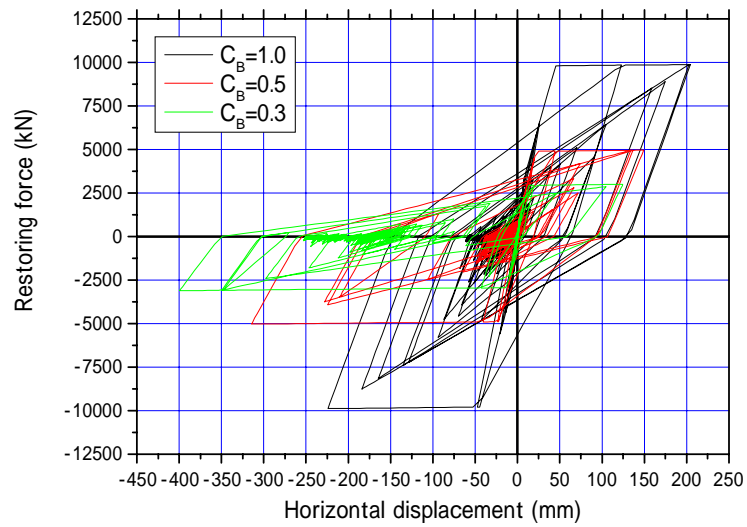


図 3.51 せん断力 - 水平変形関係 (T=0.3)

表 3.8 解析パラメータ (T=0.5)

		解析ケース		
		Case 1 ($C_B=1.0$)	Case 2 ($C_B=0.5$)	Case 3 ($C_B=0.3$)
耐力 (kN)	Fc	3201.33	1600.67	960.40
	Fy	9604.00	4802.00	2881.20
変形 (mm)	Dc	20.69	10.34	6.21
	Dy	124.12	62.06	37.24

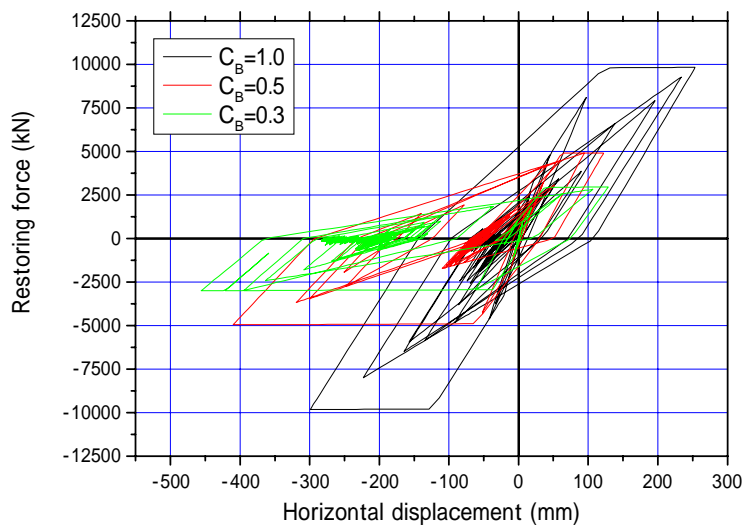


図 3.52 せん断力 - 水平変形関係 (T=0.5)

表 3.9 塑性率がほぼ 1 となる入力レベル

		C_B		
		0.3	0.5	1.0
周期	0.3	200	300	650
		0.15	0.23	0.49
	0.5	120	200	420
		0.09	0.15	0.32

上段:最大入力地動加速度(gal) 下段:原波形に対する比率

次に、気象庁 (JMA) 小千谷 EW 成分を対象に、同様の復元力モデルと各パラメータ (前出の表 3.7、表 3.8) を設定して弾塑性地震応答解析を行った。

弾性周期 0.3 秒の場合の各ケースでのせん断力 - 水平変形関係を図 3.53 に示す。最

大塑性率は $C_B=1.0$ で 2.4、 $C_B=0.5$ で 6.5、 $C_B=0.3$ で 18.0 であった。

同様に、弾性周期 0.5sec に対する弾塑性地震応答解析による各ケースでのせん断力 - 水平変形関係を図 3.54 に示す。最大塑性率は $C_B=1.0$ で 1.8、 $C_B=0.5$ で 3.2、 $C_B=0.3$ で 7.7 であった。弾性周期 0.3sec に比べて応答値は非常に小さくなっている。

以上のように、弾塑性解析を実施した結果、JMA 小千谷 EW 成分においても弾性周期 0.3sec 程度および 0.5sec 程度の建物共に D_s が 0.5 以下では塑性率 4 を超える大きな応答値を生じたが、K-Net 小千谷に対する結果に比べて、その応答値は小さくなった。また、応答塑性率がほぼ 1 となるための入力地震動レベルを表 3.10 に示す。表から建物の応答塑性率がほぼ 1 以下となるためには、 $C_B=0.3$ で原波形を約 20% に、 $C_B=0.5$ で約 30% に、 $C_B=1.0$ で約 60% に低減する必要があることが分かる。

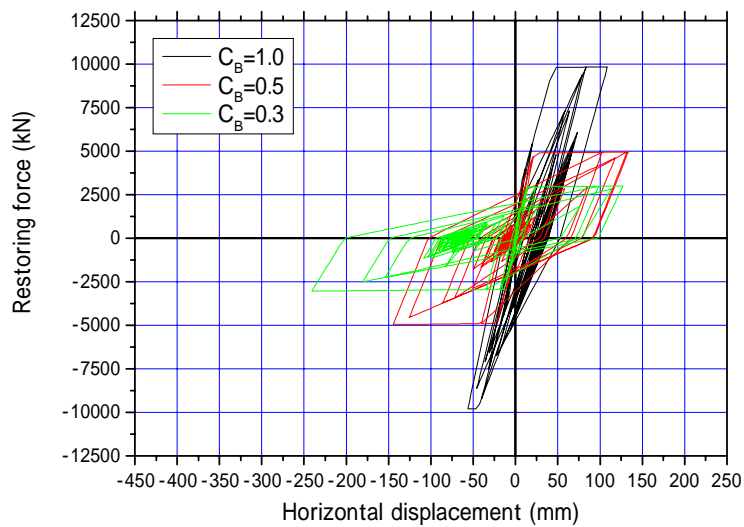


図 3.53 せん断力 - 水平変形関係 (T=0.3)

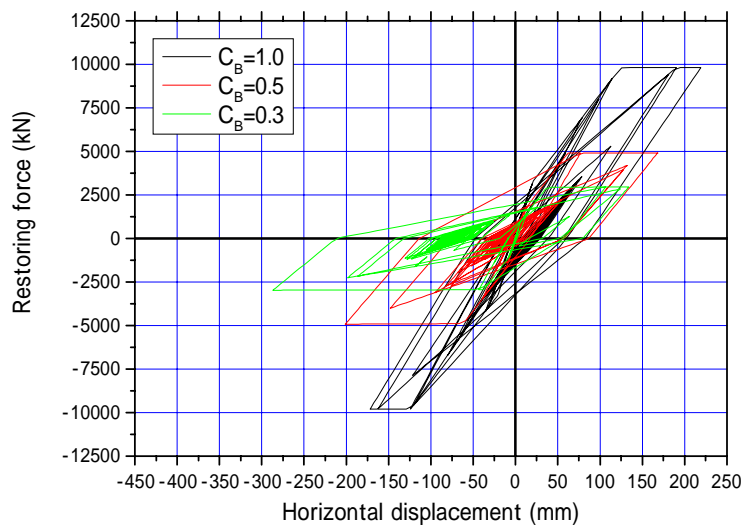


図 3.54 せん断力 - 水平変形関係 (T=0.5)

表 3.10 塑性率がほぼ 1 となる入力レベル

		C _B		
		0.3	0.5	1.0
周期	0.3	170	270	550
		0.19	0.30	0.61
	0.5	170	280	560
		0.19	0.31	0.62

上段:最大入力地動加速度(gal) 下段:原波形に対する比率

3.5 まとめ

前項までの検討の結果、現段階では以下のことが明らかとなった。

- (1) 本震の震源メカニズムは西側の岩盤が東側の岩盤にのりあげた逆断層型の地震である。また、大きな余震は本震とは異なる断層面でも発生している。
- (2) 遠地実体波記録と近地強震動記録を用いて断層面での破壊伝搬過程を推定した結果、地震のモーメントマグニチュード(Mw)は6.5となった。また破壊継続時間は11秒、最大滑り量は3.7mと推定された。さらに断層面上における地震滑り量分布も推定した。これらについては、建築研究所ホームページに公開した。
- (3) 震度の大きな地点が断層面に沿って北東 - 南西に長く分布している。
- (4) 最大加速度についても500ガルを超える地域が震央を中心に北東 - 南西に長く分布しており、震央付近では1000ガルを超える加速度が観測されている。
- (5) 震央付近の強震観測記録(小千谷、十日町、長岡など)を見ると、比較的近い地点でも最大加速度で1.5倍程度の差を示すもの、地盤の動特性の変状などの可能性が記録から読み取れるもの、方向性が顕著なものなどがある。
- (6) 1995年兵庫県南部地震では、最大速度振幅が従来に比較して極めて大きい記録が見られたが、今回の観測記録のうち、K-Net小千谷で100cm/sを超える速度振幅が記録されている。JMA小千谷地点でも90cm/s程度の最大速度を記録した。また、震度7を観測した自治体震度観測点の川口町観測点や山古志村観測点では、1.3秒、2秒といった周期の長い成分の勢力が大きく卓越する地震動を記録している。
- (7) 小千谷、川口、山古志各地点の記録を1995年兵庫県南部地震時のJMA神戸、JR鷹取、大阪ガス葺合といった、同地震での最大級の強震記録の応答スペクトルと比較すると、周期1秒以下では、小千谷での両記録(K-NET、JMA)が兵庫県南部地震の時の地震動レベルを上回るほか、周期1秒以上では、川口、山古志各地点の記録が1995年兵庫県南部地震時の神戸地域の記録と同程度の勢力を有している。
- (8) 地盤上で観測された地震動記録による構造物の非線形応答性状を限界耐力計算における要求曲線による方法などを用いて検討した。これらの解析結果と観測地点周辺の建築物の被災状況を比較した場合、両者が必ずしも良い対応をしていない地点が有り、個々の建築物への実効入力の評価が今後の課題であると思われる。
- (9) 前項を受け、余震が頻発していたことから、主要3地点(川口町役場、小千谷市役所、小千谷小学校)で建築物を対象とした余震観測を行った。この3地点の中には、強震記録の振幅レベルに比して近隣建物の被害が比較的軽微であった地点も含まれている。いずれも、本震を記録した地盤上の観測記録との比較を目的とした。大きな余震記録は得られなかったが、小千谷小学校校舎1階とK-net小千谷の記録との比較では、加速度振幅レベルに大きな差異が認められた。また、小千谷市役所の庁舎1階と地盤上での記録の比較においても、庁舎1階の記録との有意な差を検出している。このようなことから、K-NET小千谷地点で得られた加速度記録が、

そのまま近くの小千谷小学校に作用したとは考えられず、実効入力地震動のレベルは K-NET による地震動より小さかったと考えるのが妥当であろう。

今後の課題として以下のことがあげられる。

- (1) 本震、余震について、多くの強震データが公表されているので、それらの記録の分析を引き続き行なう。
- (2) 今回の地震では、震源に近い地点を中心に、極めて大きな加速度振幅が観測された。また、その応答スペクトルも周期 1 秒以下で過去最大級のレベルである。また、川口町、山古志村など甚大な被害を被った地点では、周期 1 秒以上でも 1995 年兵庫県南部地震における神戸地域での地震動レベルに近いものであった。
- (3) K-net 小千谷地点で観測された卓越周期約 0.7 秒の本震加速度記録と周辺建築物の被災状況との乖離について検討するため、小千谷小学校校舎 1 階で余震観測を実施し、K-net 小千谷地点と振幅レベルを比較した。それによると、最大加速度値においては、校舎 1 階では K-net 観測点のその 1 / 2 ~ 1 / 3 であった。またフーリエスペクトルでの比較でも、周期 0.2 ~ 0.5 秒で両観測位置のスペクトルレベルの間に同程度の差異が認められた。解析対象となった余震記録は地震規模のやや小さいものであるため、本震レベルでの比較でも同様な差異が認められるかどうかは今後の検討を要するものの、本震時に K-net 観測点から 100 メートル程度離れた小千谷小学校校舎建物に、同観測地点での本震記録がそのまま入力したとは考えにくく、周辺建物への入力地震動を特定するためには、今後校舎建物を含む観測地点周辺の表層地盤構造などを特定した上で、建築物への地震入力メカニズムの解明などを行う必要がある。
- (4) 被災地域は山間の崖地、傾斜地あるいは、河川沿いに土砂が厚く堆積した地域に開かれた町、村落であり、この地域の地形的、地質的な特徴が被災地での地震動の大きさや特性にどのような影響を与えたかについても今後検討する必要がある。
- (5) 今回の地震の震源に近い地域では構造物内への強震計の設置が少なかったため、実際の入力地震動レベルの推定を困難にしている。地域の主要な構造物（市町村庁舎など）への強震計の設置を進める方策を検討する。

本章における市町村名は地震発生当時の市町村名で記載