

3. 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。新潟県の震度情報ネットワークでは川口町で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、新潟県のネットワークの山古志村、小国町、及び気象庁の震度観測地点の小千谷市の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。

独立行政法人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（以下K-NET小千谷と表記）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、K-NET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2月2日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、地方自治体および防災科研である。本震で震度7とされた川口町川口については、波形は未公表であるが、最大加速度振幅が東西方向で 1675cm/s^2 、南北成分で 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。

前出のK-NETによる強震動については、余震も含めて波形記録が逐次公表されており、気象庁の観測点についても10月までの地震の観測記録が公表されている。しかしながら、震源近傍の市町村に配置されている新潟県の震度情報ネットワークの震度計による観測記録については、それぞれの計測震度と最大加速度振幅が気象庁より公表されているものの、波形記録は未公表で、振動数特性などの揺れの特徴等については、現段階では必ずしも明らかになっていない。

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き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きているが、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。

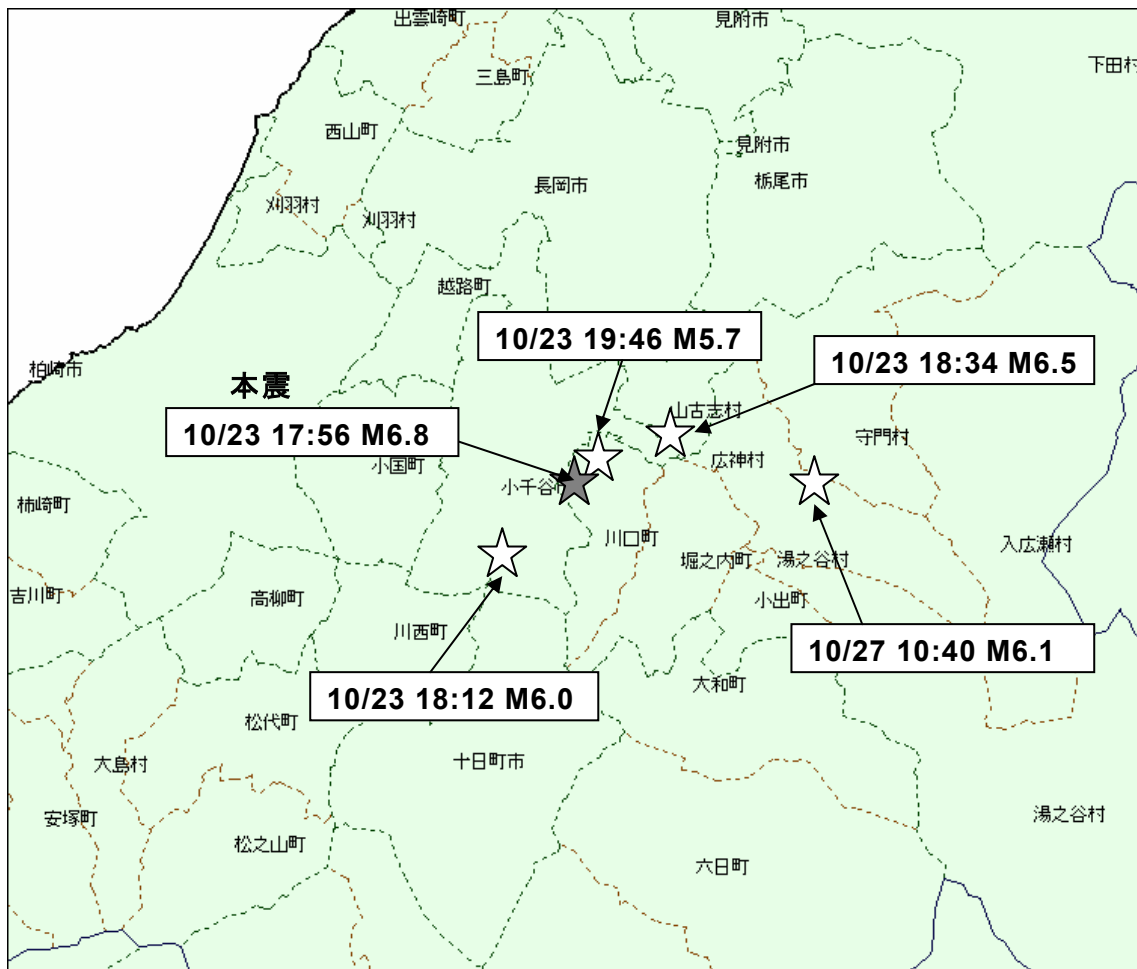


図 3.1 本震と主な余震の発生位置

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(図3.1(b)の右上の模式図参照)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。

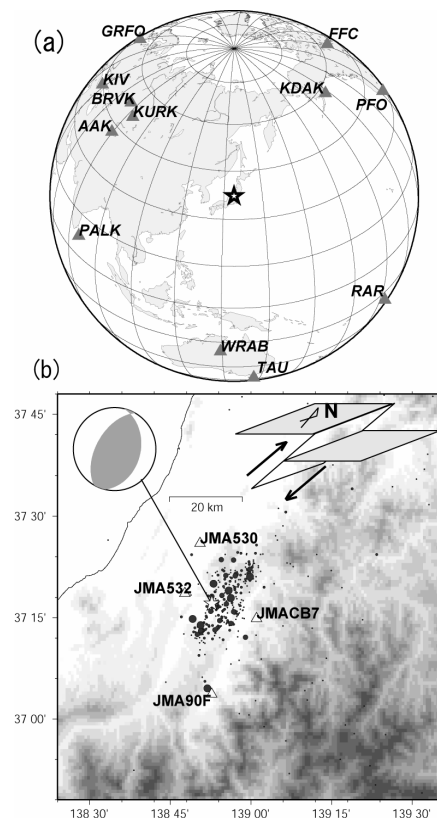


図 3.2 使用した観測点分布 (a) 遠地実体波記録、(b) 近地強震動記録、丸印は気象庁一元化震源、震源メカニズム解は本解析の結果を示す。

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、防災科研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: 広神村）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。

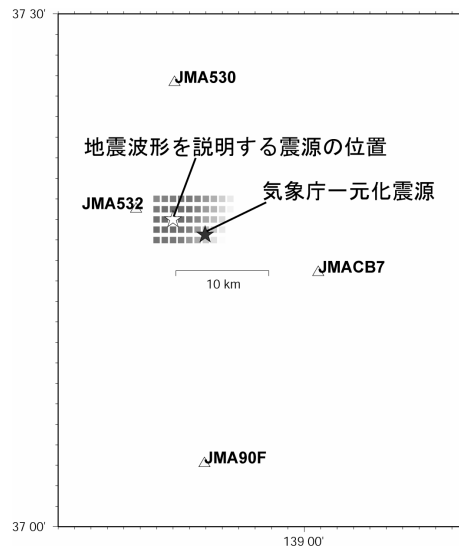


図 3.3 深さ 10.5 km における波形の残差変化分布、濃い色の点ほど観測波形が再現されている事を示す。

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。気象庁マグニチュードは地震動の変位振幅から算出される地震の規模を表す指標であり、モーメントマグニチュードは断層の大きさやすべり量から求められる地震モーメントから換算した値である。このため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とされる。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低下量を求めると、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。

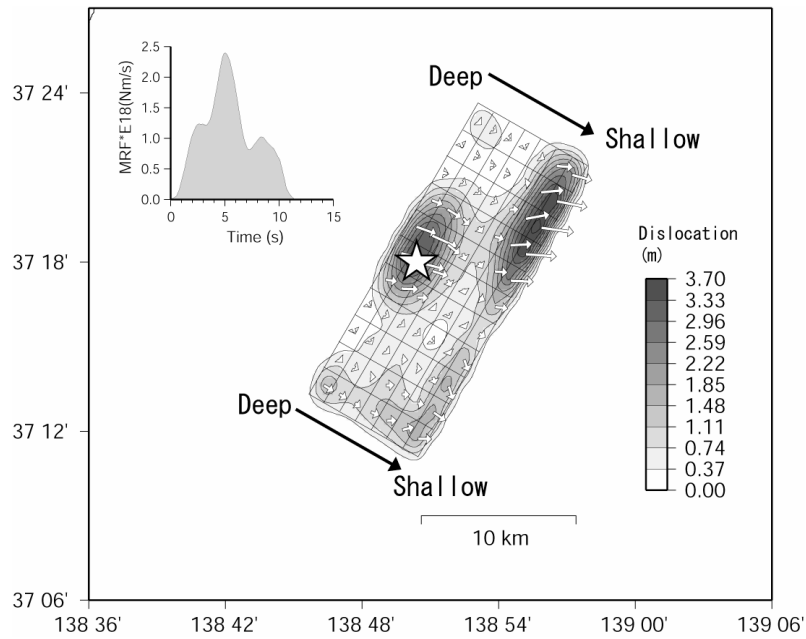


図 3.4 本震時の地震時すべり量分布と震源時間関数

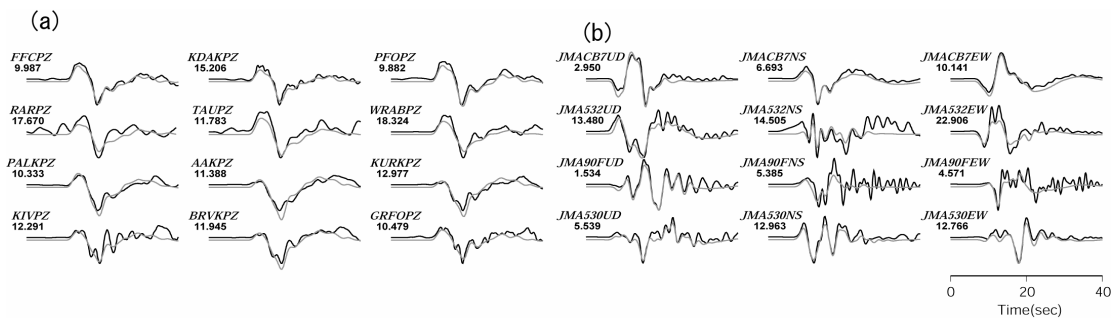


図 3.5 観測波形（黒線）と理論波形（灰色線）との比較、(a) 遠地実体波、観測点名の下に書いてある数字は最大振幅 (μm) (b) 近地強震動記録、観測点名の下に書いてある数字は、最大振幅 (cm)

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、氾濫源堆積物、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-小出構造線にはさ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、それらの探査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 3m 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 4m と 9m 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。

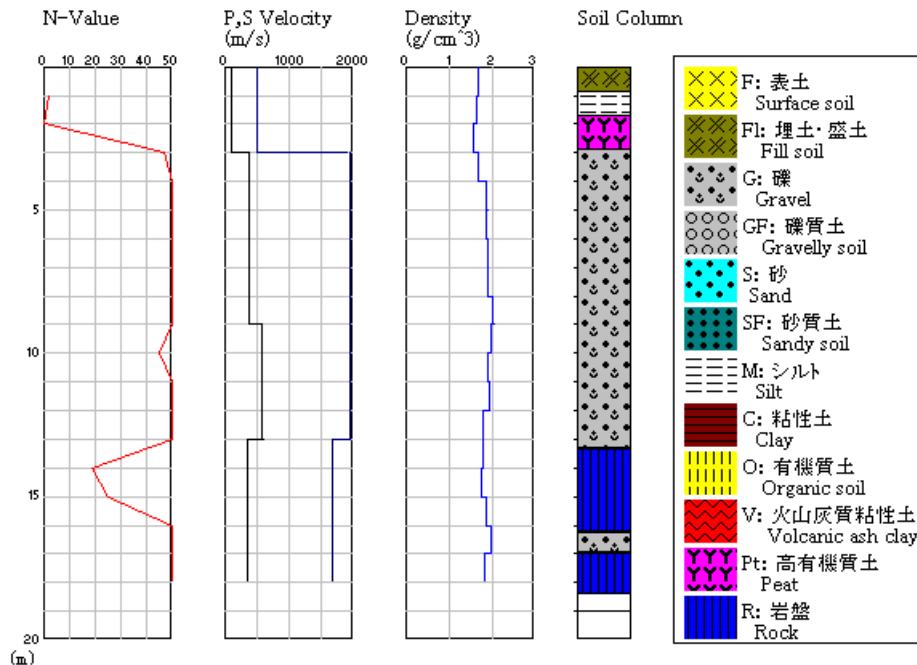


図 3.6 K-NET 小千谷(NIG019)の土質図⁸⁾

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 I」編集委員会編、日本の地質 4 中部地方 I、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 地震動の特徴

3.3.1 本震の地震動特性

(1) 地震動強さの分布

気象庁¹⁾、主として新潟県が管理する地方自治体の震度情報ネットワーク、K-NET²⁾及び KiK-net³⁾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。なお地方自治体の震度情報ネットワークの計測震度や最大加速度は気象庁から公表されており¹⁾、また 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(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面に沿って北東-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 500cm/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、震央付近では 1000cm/s^2 を超える加速度が観測されている。

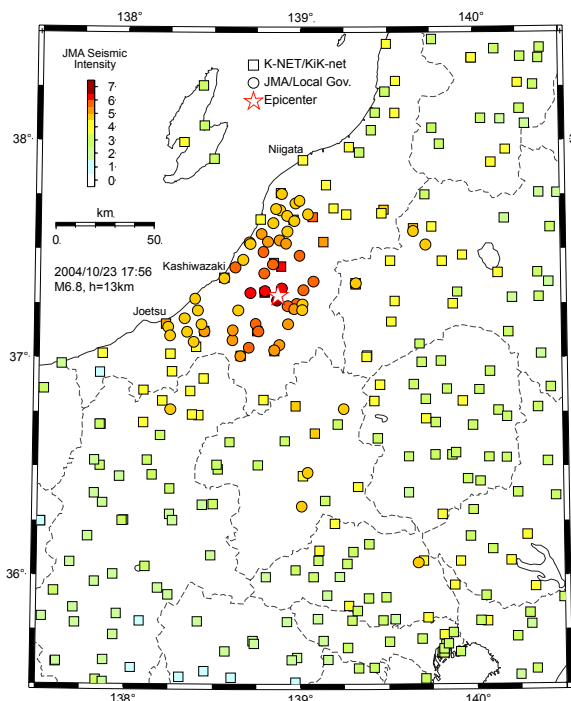


図 3.7 本震(2004/10/23 17:56)の震度分布

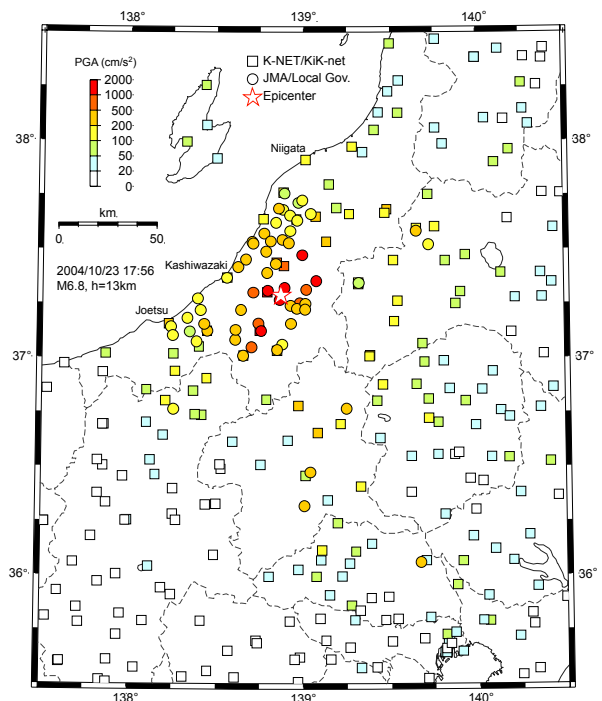


図 3.8 本震(2004/10/23 17:56)の最大加速度分布

(2) 震央付近の強震記録

前述した 4 つの観測網のうち、気象庁(JMA)の計測震度計や K-NET 及び KiK-net の強震計で得られた強震記録が公開されている¹⁾⁻³⁾。このうち震度 5 以上(計測震度 4.5 以上)の強震記録の一覧を表 3.1 に、震央近傍の観測地点の位置を図 3.9 に示す。なお気象庁の観測地点は地名の前に JMA を、K-NET の観測地点は地名の前に K-NET を付して表す。

このうち K-NET 小千谷、JMA 小千谷、K-NET 十日町、K-NET 長岡支所、K-NET 長岡、及び JMA 長岡の加速度記録を図 3.10 から図 3.15 に示す。K-NET 小千谷(図 3.10)と JMA 小千谷(図 3.11)は小千谷市の市街地に位置しており、両者の間の距離は 700 m

程度である。両者の加速度記録の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ピークが尖る現象が認められ、表層地盤の液状化などの影響が推測される。K-NET 十日町の記録(図 3.12)は NS 成分で 1700 cm/s^2 を超える最大加速度を記録した。一方で激しい揺れの継続時間が極めて短く、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。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おり、K-NET 長岡(NIG017)と JMA 長岡(JMA530)は市街地の比較的近い場所にある。このため K-NET(図 3.14)と JMA 長岡(図 3.15)はよく似た記録となっているが、K-NET 長岡支所は他の 2 つの記録と比べて振幅が大きく、様相が異なる。

表 3.1 気象庁の震度計、K-NET 及び KiK-net の強震計による震度 5 弱(計測震度 4.5)以上の強震記録

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
K	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	NIG021	十日町市	21.1	6.2	1715.7	849.2	564.4	58.87	44.82	13.62
K	NIG028	長岡支所	15.1	6.1	870.5	706.1	435.6	61.85	60.55	26.05
KiK	NIGH06	加茂市	43.9	5.7	356.1	409.2	205.4	24.91	25.30	12.47
K	NIG020	小出市	10.6	5.5	521.8	407.6	312.2	31.72	25.52	14.56
JMA	JMA530	長岡市	16.2	5.5	395.8	430.3	324.5	31.30	23.55	16.85
K	NIG017	長岡市	16.9	5.5	468.5	369.0	331.0	40.05	23.55	15.05
JMA	JMA90F	六日町	25.3	5.2	136.0	111.3	186.5	25.44	18.57	9.16
KiK	NIGH09	下田村	35.9	5.2	368.4	390.4	244.7	14.70	13.69	5.23
K	NIG025	直江津	58.8	5.2	189.9	200.5	38.4	16.63	18.62	2.84
K	NIG022	塩沢町	28.4	5.1	342.1	341.6	126.5	17.98	21.14	3.63
KiK	FKSH21	只見町	40.0	5.1	246.4	361.9	137.5	14.58	16.18	5.52
K	NIG023	津南町	36.1	5.0	397.0	274.6	86.5	27.87	28.12	9.37
K	NIG024	安塚町	41.7	5.0	240.0	217.6	55.2	13.73	9.54	3.46
K	NIG018	柏崎市	28.8	4.9	97.9	144.3	75.6	13.09	28.71	6.83
K	NIG014	三条市	39.7	4.8	117.6	96.3	76.2	14.59	13.81	6.13
K	NIG012	鹿瀬町	69.5	4.9	236.7	291.1	62.9	16.26	14.78	3.46
JMA	JMACB7	広神村	13.8	4.7	333.9	286.4	310.8	15.55	13.68	5.39
K	FKS028	只見町	40.1	4.7	141.3	167.0	123.2	11.22	11.96	3.89
K	GNM003	沼田市	72.9	4.7	359.0	292.6	126.0	8.43	7.13	2.81
JMA	JMA51E	久喜市	154.5	4.7	164.8	173.6	33.6	10.81	10.05	1.87
JMA	JMA90E	巻町	52.2	4.5	94.6	92.8	35.4	12.04	13.09	5.51
K	NIG013	巻町	52.6	4.5	95.5	129.2	38.8	13.36	13.99	5.14
K	GNM002	水上市	57.4	4.5	341.0	279.4	194.5	8.12	6.17	2.95
JMA	JMAE1C	上越市	58.6	4.5	74.4	139.0	23.9	6.92	8.19	2.18
K	FKS022	西会津町	77.0	4.5	131.6	148.0	70.7	8.67	6.97	2.95
JMA	JMAD19	片品村	67.1	4.5	162.0	200.0	101.6	4.85	8.93	2.76
JMA	JMA8B0	西会津町	76.4	4.5	184.2	135.8	56.1	10.50	8.30	2.98

種別は JMA: 気象庁、K: K-NET、KiK: KiK-net を表す。

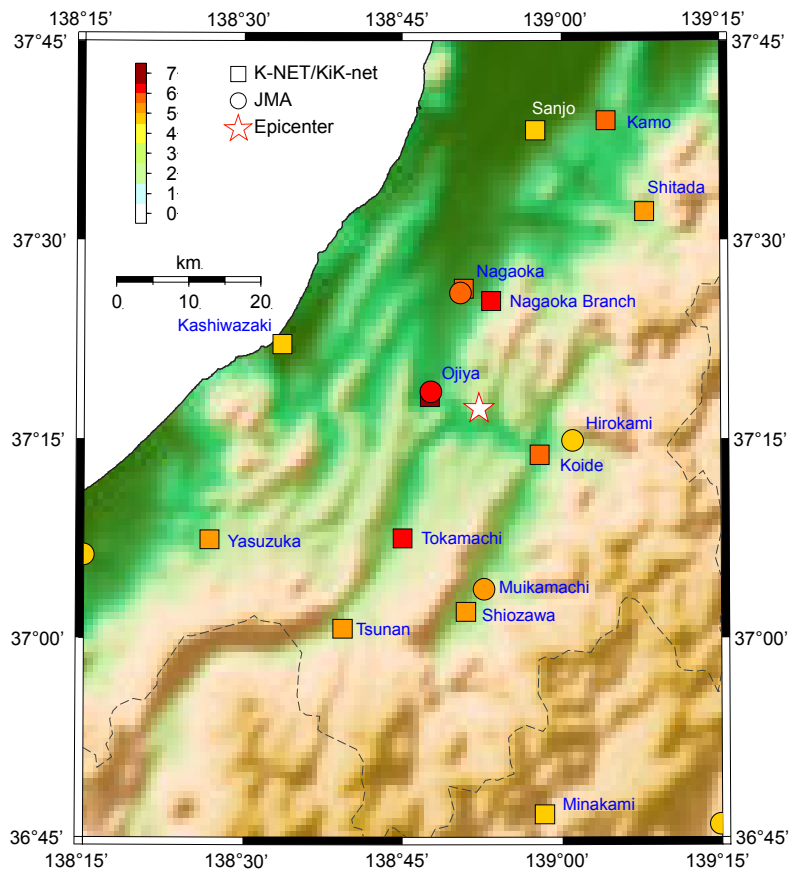


図 3.9 震央付近の強震観測記録が得られた気象庁、K-NET 及び KiK-net の観測地点と震央位置

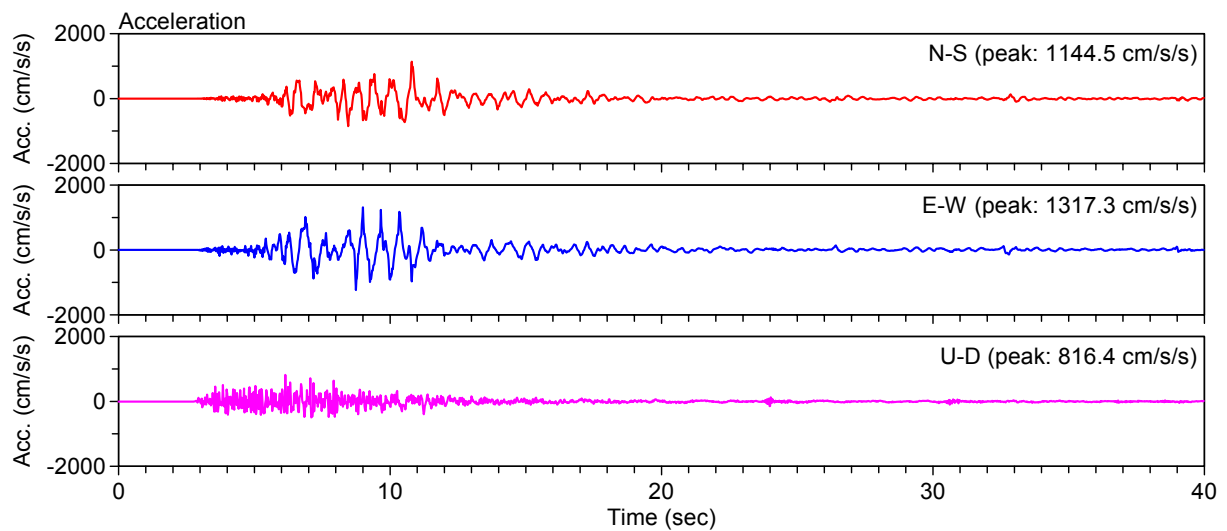


図 3.10 K-NET 小千谷(NIG019)で得られた強震記録

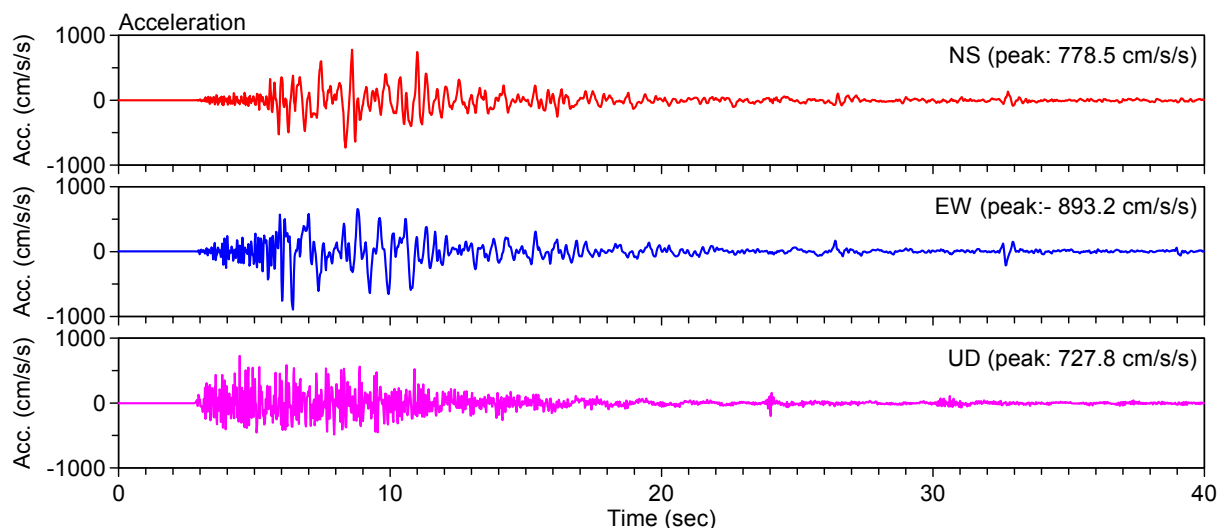


図 3.11 JMA 小千谷(JMA532)で得られた強震記録

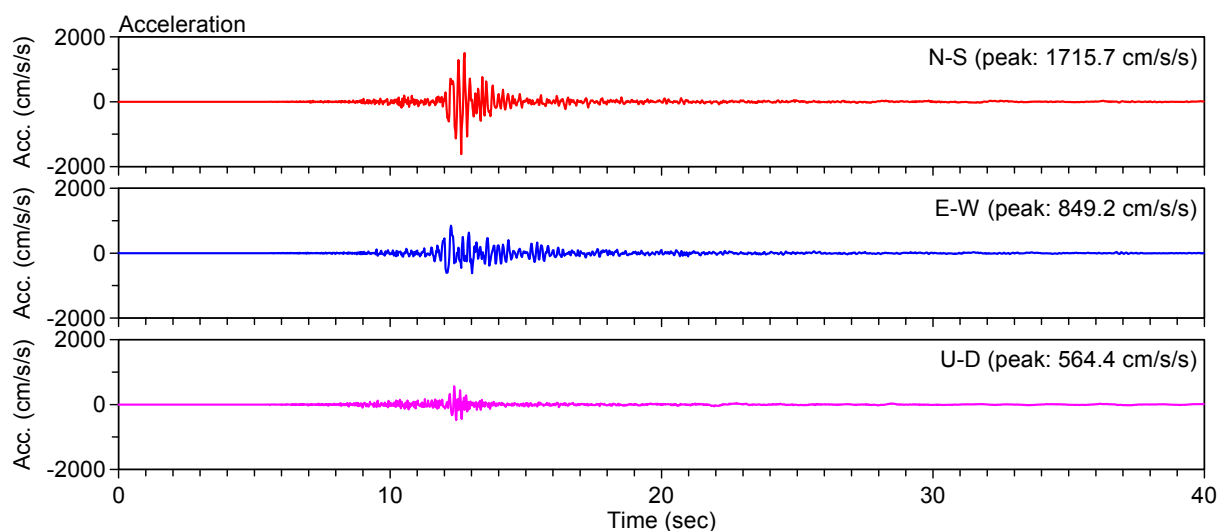


図 3.12 K-NET 十日町(NIG021)で得られた強震記録

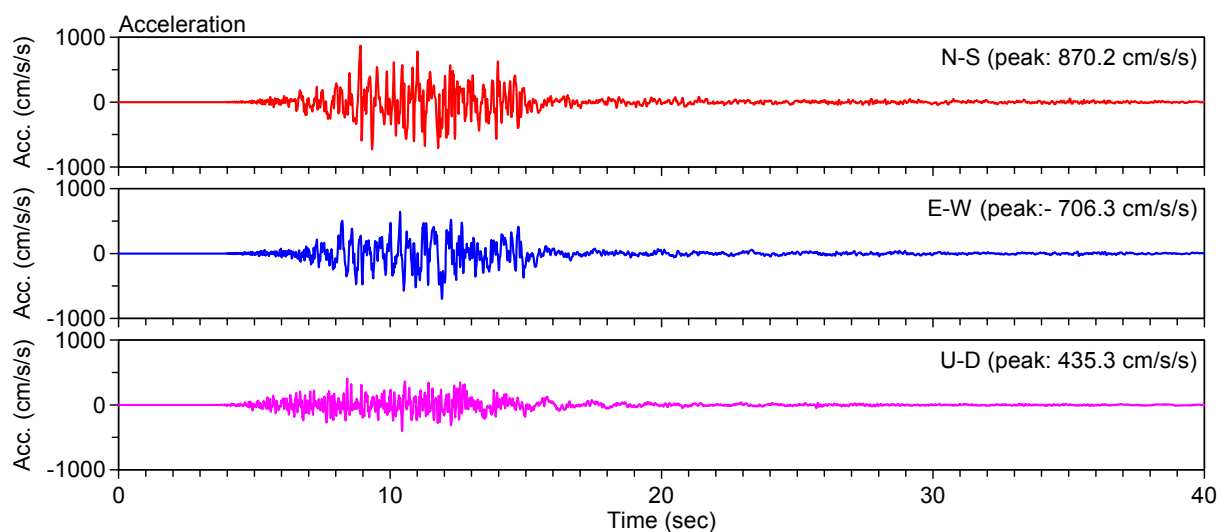


図 3.13 K-NET 長岡支所(NIG028)で得られた強震記録

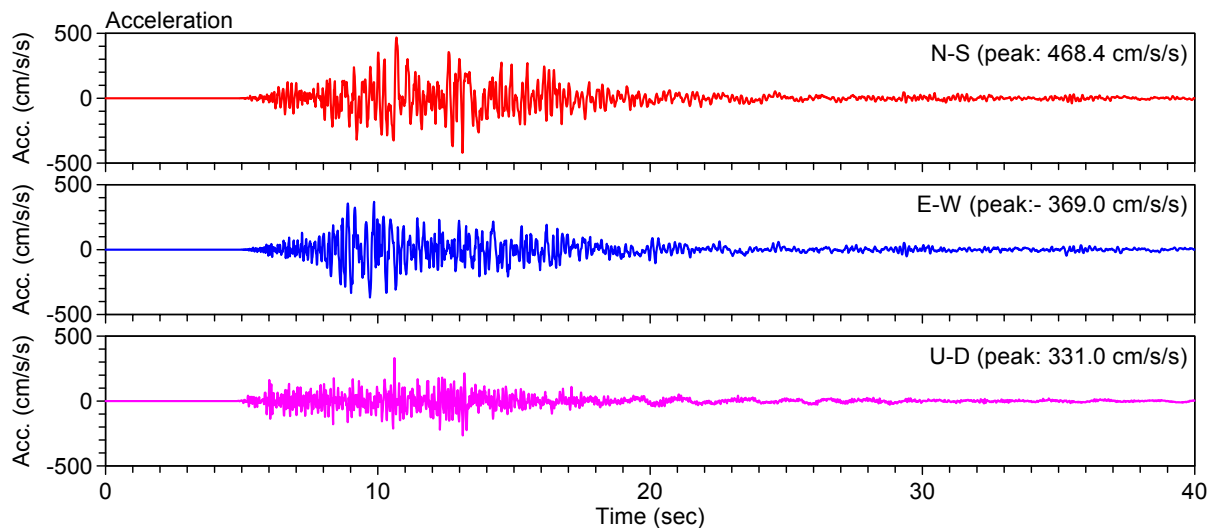


図 3.14 K-NET 長岡(NIG017)で得られた強震記録

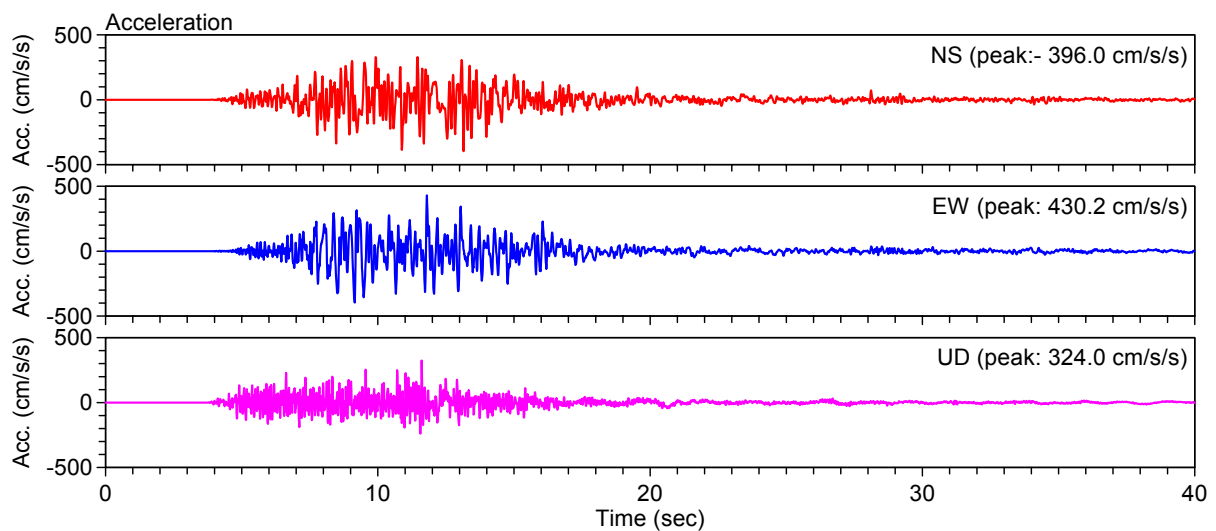


図 3.15 JMA 長岡(JMA530)で得られた強震記録

(3) 建築研究所の強震記録

新潟県中越地震の本震の際、建築研究所の強震観測網で得られた記録の一覧を表 3.2 に示す⁴⁾。東北から関東にかけての広い範囲で強震記録が得られている。最も近い観測地点は上越市の社会教育会館で、RC 造 2 階建て建物の 1 階で 100 cm/s^2 を超える加速度が得られている。得られた加速度波形を図 3.16 に示す。激しい揺れの継続時間は 10 秒程度で、その後しばらく長い周期の揺れが続いている。また震央から 71 km の新潟市役所分館は 9 階建ての RC 造庁舎で、地下 1 階で 71 cm/s^2 、建物頂部で 127 cm/s^2 の最大加速度が得られている。加速度波形を図 3.17 に示す。やはり周期の短い主要動の後に周期の長い後続波がかなりの時間続いており、深い地下構造による増幅や表面波の影響と考えられる。

表 3.2 建築研究所の強震観測記録

記号	観測地点	距離 (km)	計測 震度	設置 方位	設置 位置	最大加速度 (cm/s ²)		
						H1	H2	V
JET	上越市社会教育館	57.3	4.5	175°	01F*	112.2	96.2	38.7
NIG	新潟市庁舎分館	71.0	4.2	061°	B1F*	49.2	71.4	21.3
					07F	111.1	126.5	43.0
NIT	日本工業大学	159.5	3.9	288°	GL*	64.9	59.3	14.9
					01F	29.9	24.9	9.9
					06F	84.0	65.8	15.9
ANX	建築研究所新館	167.9	3.5	180°	A01*	28.0	30.9	9.8
					A89	13.6	12.1	7.0
					BFE	21.0	17.5	11.3
					8FE	67.8	79.3	12.6
TRO	鶴岡合同庁舎	180.7	3.1	182°	01F*	17.3	14.7	4.3
					04F	18.5	19.3	4.4
NMW	国立西洋美術館	193.3	3.2	218°	GL*	27.8	28.1	15.8
					B1FW	12.5	22.2	10.4
					B1FE	17.4	23.4	13.6
					01FW	10.3	16.5	10.8
					01FE	12.6	17.5	14.6
CG3	中央合同庁舎 3 号館	196.2	2.3	208°	03F	16.8	17.3	13.3
					B2F*	7.2	7.6	4.9
					B1F	8.3	8.7	6.8
CG2	中央合同庁舎 2 号館	196.3	2.3	208°	12F	12.9	14.7	10.6
					B4F*	5.8	5.8	5.9
					13F	13.6	13.4	7.7
CGC	中央合同庁舎 6 号館	196.5	2.3	208°	21F	18.1	17.8	11.7
					01F*	6.9	8.1	5.6
					20B	28.5	17.7	18.9
MNM	南砂住宅 3 号棟	199.2	2.9	180°	19C	24.6	15.4	10.4
					15F	32.9	52.8	7.9
THU	東北大学工学部建設系建物	203.8	2.9	202°	01F*	10.4	17.2	4.3
					01F*	13.2	13.0	5.4
SND	仙台第 2 合同庁舎	206.8	2.6	074°	09F	67.1	40.0	13.6
					B2F*	5.9	6.5	5.1
					15F	21.9	44.9	7.3
SMZ	清水合同庁舎	255.7	2.3	165°	G40	6.0	5.6	4.6
					01F*	3.0	4.7	1.8
					06F	4.8	6.1	1.7

計測震度は*印の位置で算出。最大加速度の H1 は設置方位成分、H2 は直交する水平成分、V は鉛直成分。

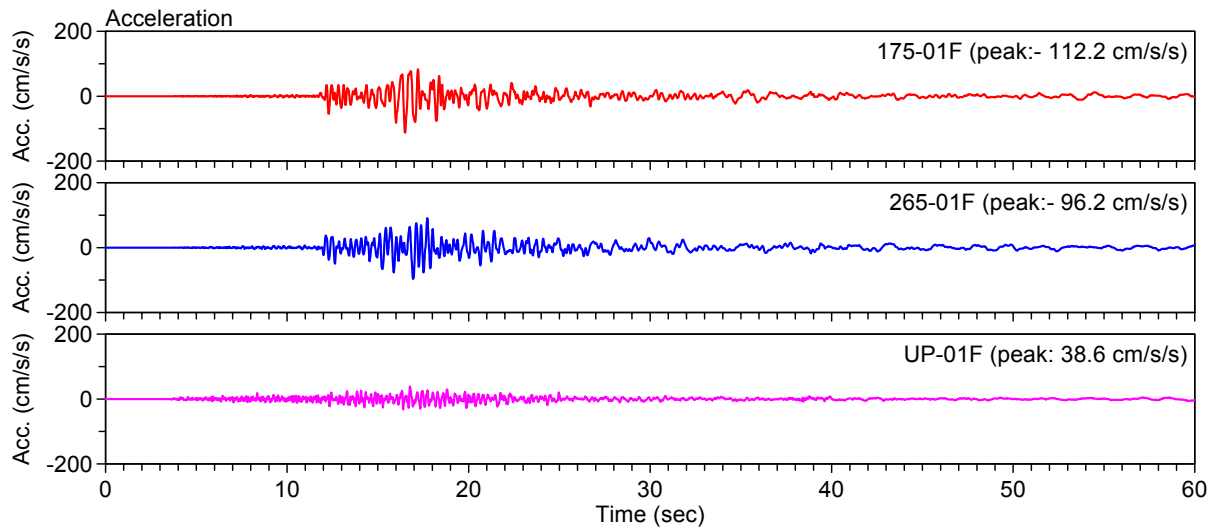


図 3.16 上越社会教育会館で得られた強震記録

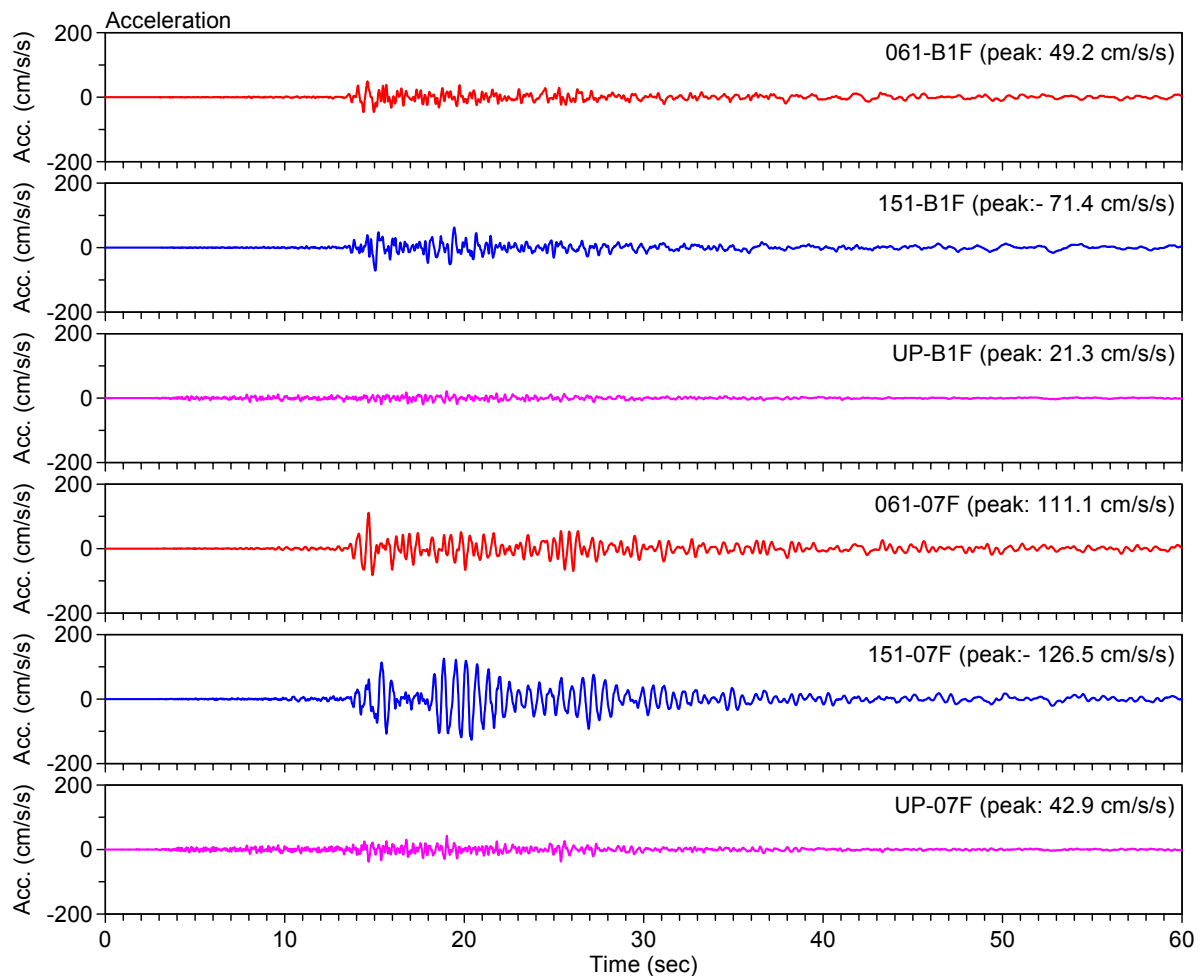


図 3.17 新潟市役所分館で得られた強震記録(上段が地下1階、下段が建物頂部)

3.3.2 強震記録の特徴と既往の記録との比較

震央周辺で震度6強以上を観測した強震記録(図3.10から図3.15)の減衰定数5%の擬似速度応答スペクトルを図3.18から図3.23に示す。小千谷市内の2つの記録を比べると1秒以上の長周期領域では応答スペクトルに大きな差はないが、K-NET小千谷の記録には0.7秒付近に際立った卓越が認められ、0.1秒辺りの短周期領域もJMA小千谷に比べ大きくなっている。これが両者の加速度記録の差異となって表れている。全体的には両者とも0.3秒から3秒辺りの成分が優勢な地震動といえる。

十日町の記録は0.2秒から0.3秒に大きなピークを持つ特異な形状の応答スペクトルとなっている。

K-NET長岡支所の記録の応答スペクトルはやはり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。

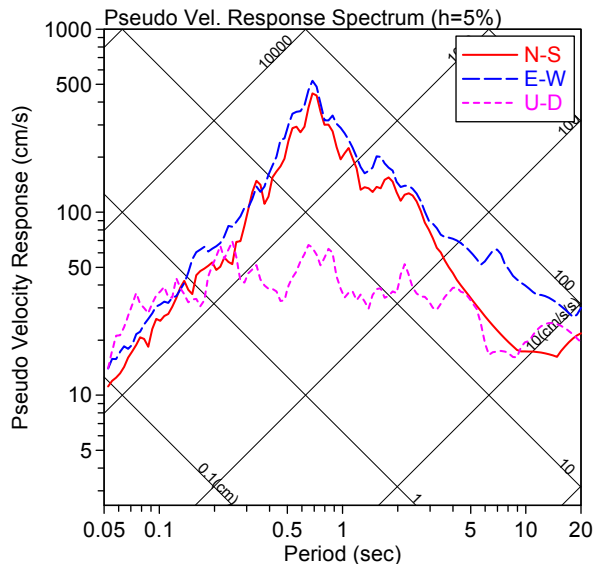


図 3.18 K-NET 小千谷(NIG019)の記録の擬似速度応答スペクトル(h=5%)

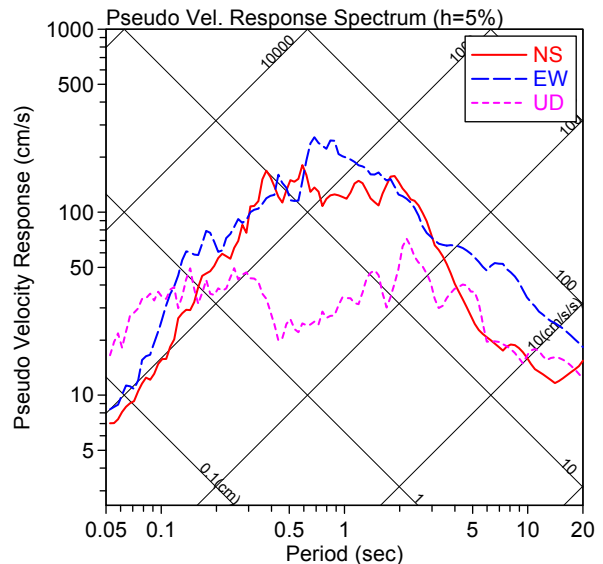


図 3.19 JMA 小千谷(JMA532)の記録の擬似速度応答スペクトル(h=5%)

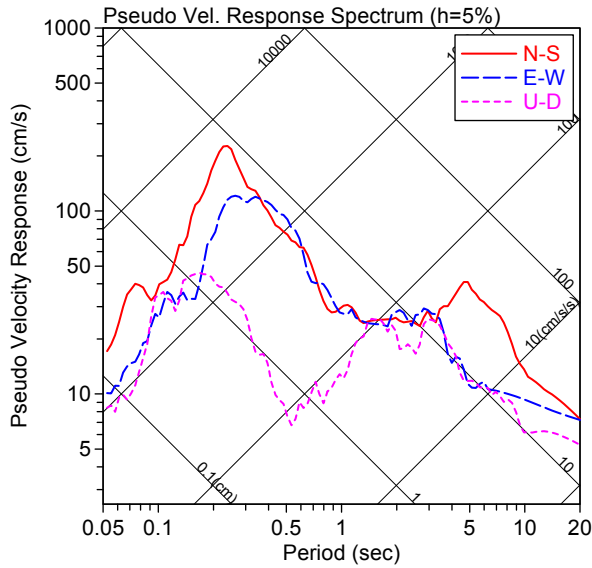


図 3.20 K-NET 十日町(NIG021)の記録の擬似速度応答スペクトル(h=5%)

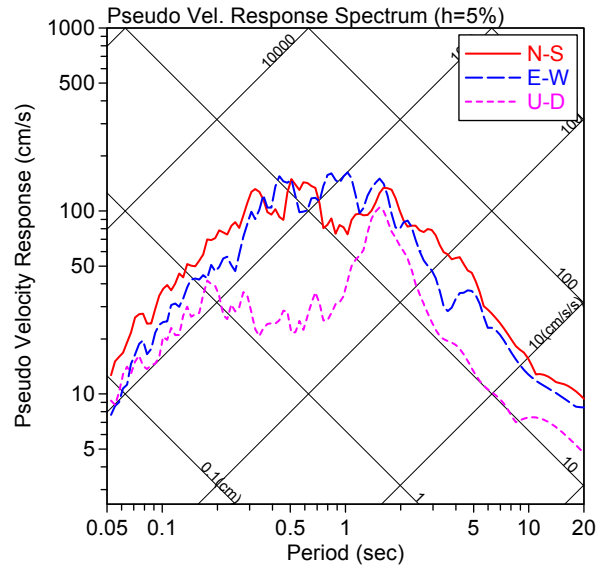


図 3.21 K-NET 長岡支所(NIG028)の記録の擬似速度応答スペクトル(h=5%)

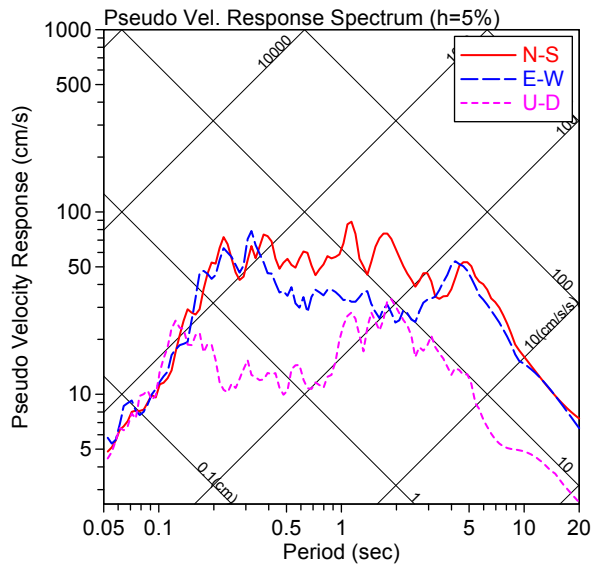


図 3.22 K-NET 長岡(NIG017)の記録の擬似速度応答スペクトル(h=5%)

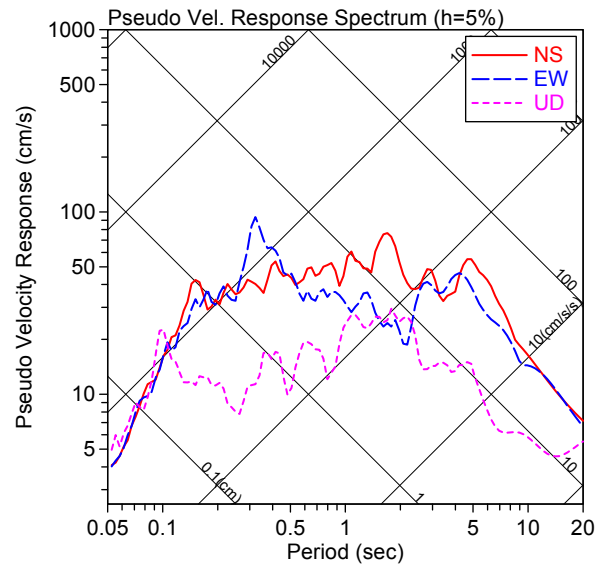


図 3.23 JMA 長岡(JMA530)の記録の擬似速度応答スペクトル(h=5%)

図 3.24 に K-NET 小千谷及び JMA 小千谷の記録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⁵⁾、JR 鷹取⁶⁾、及び大阪ガス葺合の記録の擬似速度応答スペクトルと比較して示す。減衰定数は 5%である。いずれの記録も水平 2 成分のうち大きな方向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小千谷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 4 つの地震動は概ね同じレベルである。1 秒以上の長周期領域では兵庫県南部地震で被害が大きかった鷹取や葺合の記録が、小千谷の記録を大きく上回っている。

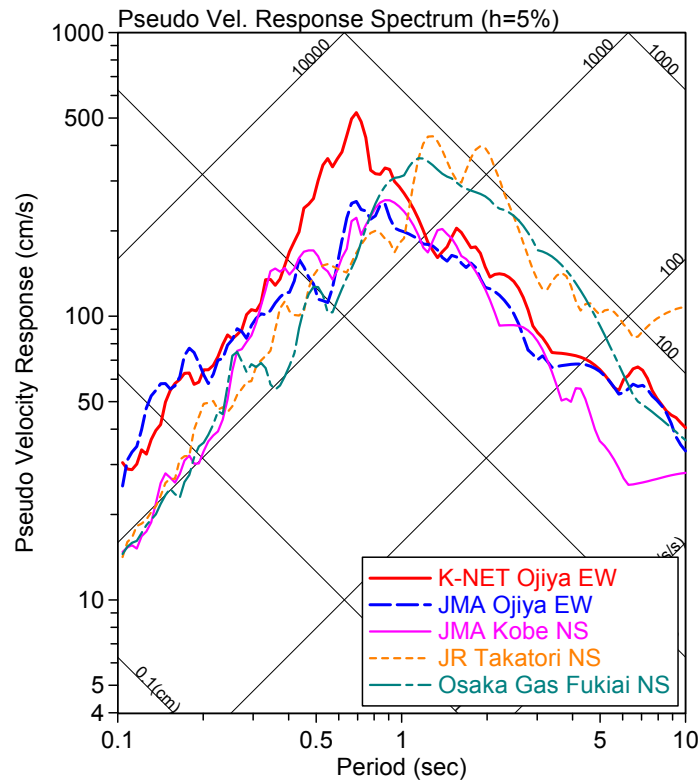


図 3.24 K-NET 小千谷及び JMA 小千谷の記録と 1995 年兵庫県南部地震の記録(JMA 神戸⁵⁾、JR 鷹取⁶⁾及び大阪ガス葺合)の擬似速度応答スペクトル(h=5%)

図 3.25 は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(以上最大速度を 50 cm/s に基準化)、及び日本建築センターの設計用入力模擬地震動レベル 1 (BCJ L1)の擬似速度応答スペクトルと、中越地震の K-NET 小千谷及び JMA 小千谷の記録を比較して示す。2 秒以下の領域では、今回得られた地震動は設計で想定している地震動の大きさを上回っているが、2 秒以上の長周期領域では大きな差は認められない。

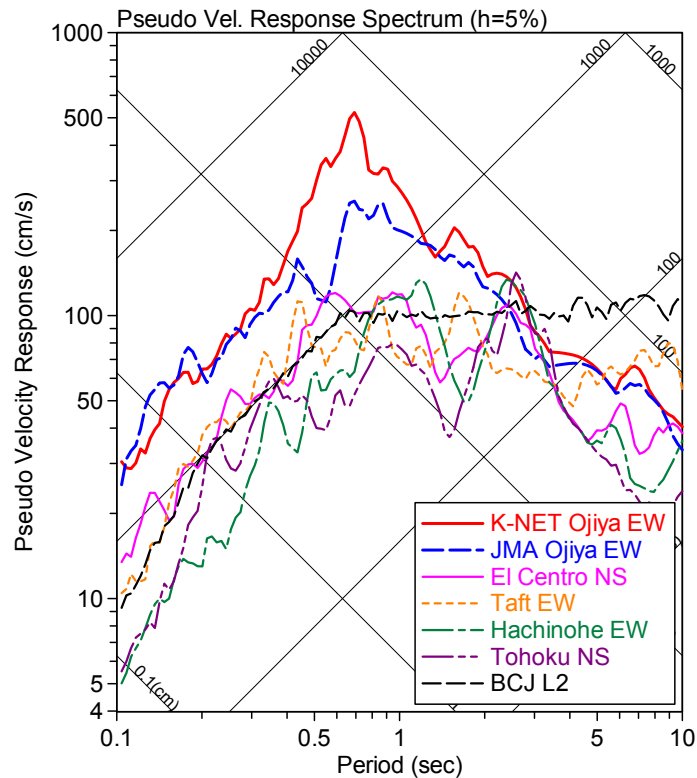


図 3.25 K-NET 小千谷及び JMA 小千谷の記録と動的設計に用いられる地震動の擬似速度応答スペクトル(h=5%)。動的設計に用いられる地震動は 50cm/s に基準化。

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) 防災科学技術研究所: K-NET, <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 3) 防災科学技術研究所: KiK-net, <http://www.kik.bosai.go.jp/>
- 4) 建築研究所強震観測: <http://iisee.kenken.go.jp/smo/>
- 5) 気象庁強震波形データ(87 型), '93~'97.3 月, 気象業務支援センター
- 6) 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 建物の振動特性把握のための余震観測

3.4.1 観測の目的と観測体制

今回の地震では大振幅の加速度記録がいくつか採取されており、それら記録の特性と被害との対応が重要な検討課題である。特に学校建築や市町村の庁舎などの公共建物で、地表上で観測される地震動と建物への入力地震動、及び建物の被害との関係を明らかにすることは重要である。このような観点から大きな地震動が観測された川口町と小千谷市で、被害が比較的軽微であった川口町役場、小千谷小学校、及び小千谷市役所を対象として強震計を設置し、余震観測を行っている。以下、各観測地点の概要を述べる。

(1) 川口町役場

川口町役場は新潟県震度情報ネットワークの川口観測地点である。3階建てRC造庁舎の建物の上下に、表3.3に示すように強震計を設置している。震度計設置地点では最も大きな震度を観測したが、庁舎の被害は軽微である。

表 3.3 川口町役場強震計設置状況

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



*地図は国土地理院 25000 数値地図を利用。

(2) 小千谷小学校

小千谷小学校は、大きな加速度記録が得られた K-NET 小千谷観測地点に近接している。3階建て RC 造校舎の 1 階と R 階(4 階相当)に、表 3.4 に示すように強震計を設置している。隣接する小千谷市民体育館はブレース破断などの被害を受けたが、小学校校舎の被害は軽い。

表 3.4 小千谷小学校強震計設置状況

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。

(3) 小千谷市役所

小千谷市役所は小千谷小学校の約 1 km 北に位置する RC 造 4 階建ての庁舎である。ここでは表 3.5 に示すように建物の 1 階及び頂部(5 階相当)、加えて地盤上に近い地点として玄関アプローチ階段下の倉庫の中に計 3 台の強震計を設置している。なお JMA 小千谷の震度計は、小千谷小学校と小千谷市役所の間、小千谷市役所から南西に 200 m 程度離れた消防署の裏に設置されている。この庁舎の被害も大きくはない。

表 3.5 小千谷市役所強震計設置状況

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

建物位置*(左)と建物外観(右: 1 階印刷室 01F は建物裏手)

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)

1 階印刷室(左:01F)と屋上階階段室(右:05F)の設置状況

*地図は国土地理院 25000 数値地図を利用。

3.4.2 観測記録とその特徴

2004 年 11 月 19 日までに観測された余震記録の最大加速度の一覧を表 3.6 に示す。参考のため K-NET 小千谷(NIG021)で得られた記録の最大加速度の表中に記してある。マグニチュードは最大で 4.7 と規模は大きくないものの、未だに頻繁に余震が発生し

ている。こ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(表中太字で記したもの)について、以下に考察を加える。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。

表 3.6 余震の観測状況(2004年11月19日13時現在)

Date Time	h	M	Latitude	Longitude	KWT		OJP		OJC			NIG 019
					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
2004/11/12 02:24	10	4.3	37°14.1'N	138°56.0'E	59	136						117
2004/11/12 13:43	10	3.1	37°13.4'N	138°50.0'E	8	19	10	-				
2004/11/13 03:42	15	2.5	37°14.2'N	138°50.1'E	-	-	7	-	-	-	-	
2004/11/13 07:24	8	3.9	37°09.7'N	138°48.2'E	-	6	-	6	-	-	-	
2004/11/13 08:23	13	2.4	37°16.9'N	138°49.1'E	-	-	-	8	-	7	5	
2004/11/13 10:01	9	4.1	37°09.7'N	138°48.1'E	28	74	18	55	-	10	14	38
2004/11/13 14:41	8	3.4	37°12.9'N	138°53.3'E	-	17	13	24	15	9	11	
2004/11/13 17:17	10	3.4	37°15.4'N	138°59.3'E	-	-	-	10	-	-	-	
2004/11/13 19:47	9	2.9	37°09.6'N	138°47.9'E	-	10	6	9	-	-	-	
2004/11/14 01:37	15	2.8	37°12.9'N	138°53.3'E	-	10	-	5	-	-	-	
2004/11/14 04:09	12	3.1	37°13.1'N	138°53.8'E	20	31	-	7	-	-	-	
2004/11/14 06:36	5	2.7	37°15.7'N	138°51.9'E	9	19	20	39	14	6	8	
2004/11/14 09:28	8	3.1	37°14.7'N	138°57.2'E	17	17	4	14	-	-	5	
2004/11/14 23:05	14	3.1	37°21.1'N	138°55.6'E	-	-	-	13	-	-	-	
2004/11/15 09:39	0	4.7	37°22.3'N	139°00.0'E	17	29	11	31	26	12	25	23
2004/11/15 12:40	10	2.8	37°16.1'N	138°57.3'E	13	16	6	12	-	-	-	
2004/11/15 13:26	9	2.6	37°14.8'N	138°56.8'E	-	-	-	6	-	-	-	
2004/11/15 21:22	7	2.4	37°13.4'N	138°54.5'E	-	11	-	-	-	-	-	
2004/11/16 04:54	13	2.5	37°16.0'N	138°55.6'E	-	12	-	17	-	-	-	
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	
2004/11/16 23:34	10	2.6	37°23.6'N	138°50.7'E	-	-	-	4	-	-	4	
2004/11/17 20:14	12	2.6	37°15.9'N	138°52.3'E	13	16	-	-	-	-	-	
2004/11/18 06:43	3	3.4	37°19.6'N	138°58.9'E	-	10	-	6	-	-	5	
2004/11/18 21:03	10	2.5	37°15.1'N	138°56.2'E	-	-	-	5	-	-	-	
2004/11/19 06:03	10	3.2	37°13.5'N	138°50.5'E	20	33	16	-	20	9	13	27

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

(1) 川口町役場

川口町役場で得られた余震記録を図3.26に、そのフーリエスペクトルを図3.27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3.28に示す。凡例の”310”は北から時計回りに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、庁舎の固有振動数は両方向とも4Hz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。

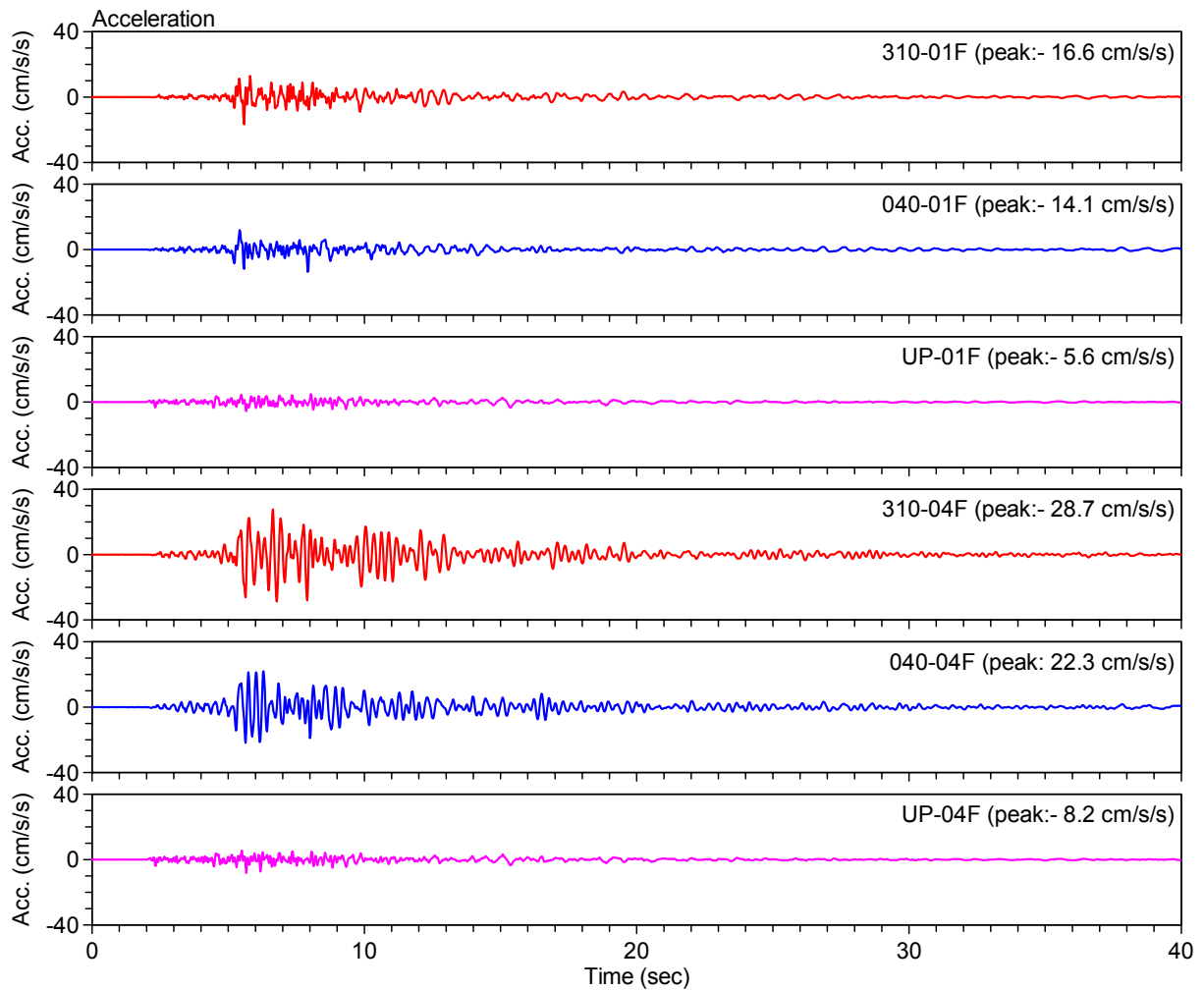


図 3.26 川口町役場(KWT)で得られた余震記録。上段が1階、下段が4階(R階)

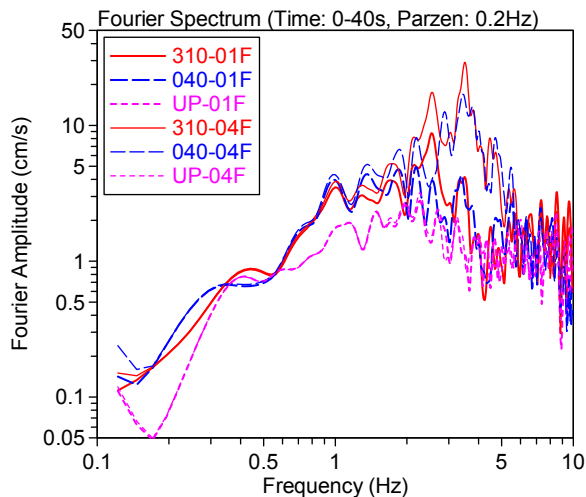


図 3.27 川口町役場(KWT)で得られた余震記録のフーリエスペクトル

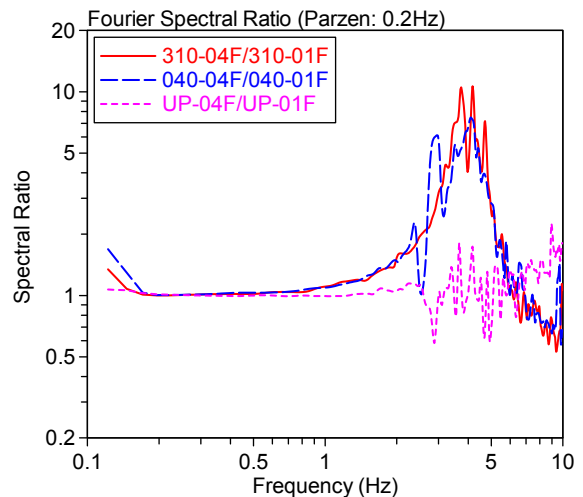


図 3.28 川口町役場(KWT)の記録のフーリエスペクトル比(4F/1F)

(2) 小千谷小学校

図 3.29 は小千谷小学校で得られた余震記録、図 3.30 はそのフーリエスペクトル、図 3.31 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 3.4 参照)。小千谷小学校では 4 階で得られた記録の水平最大加速度は 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振動数は 5 Hz から 6 Hz と、同じ階数の川口町役場に比して高目となっている。1 階の記録から算出した計測震度は 2.1 である。

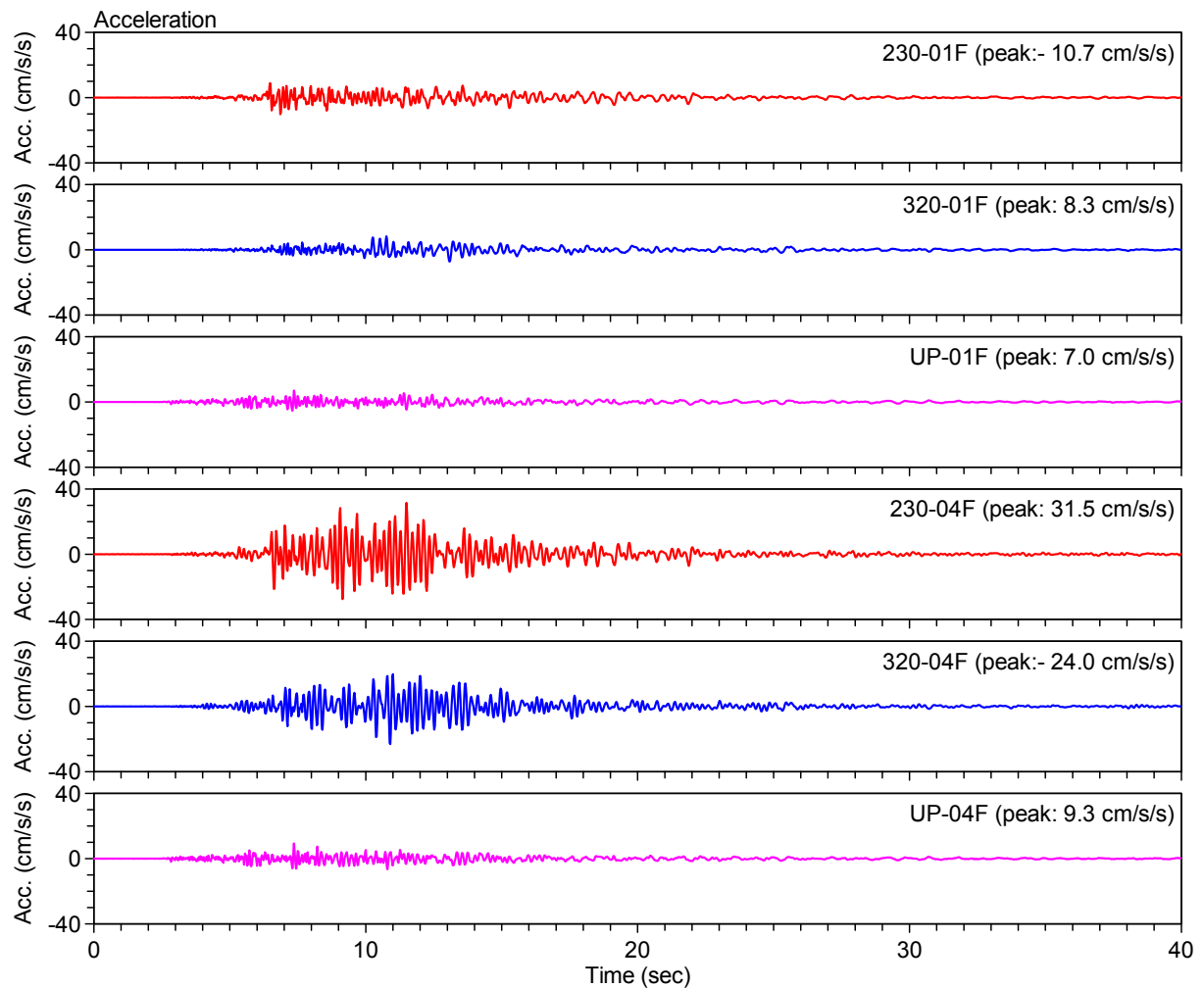


図 3.29 小千谷小学校(OJP)で得られた余震記録。上段が 1 階、下段が 4 階 (R 階)

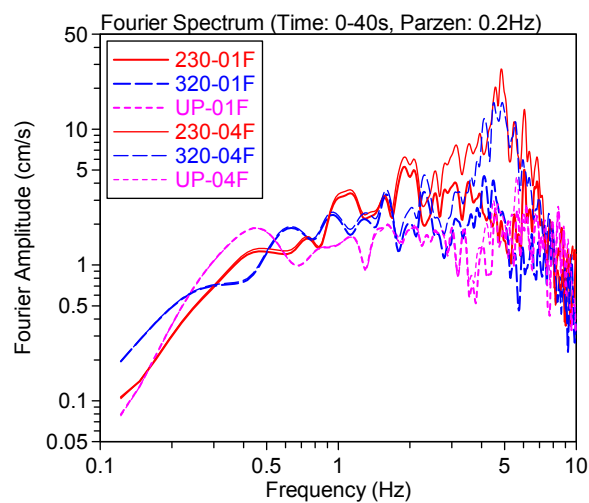


図 3.30 小千谷小学校(OJP)で得られた余震記録のフーリエスペクトル

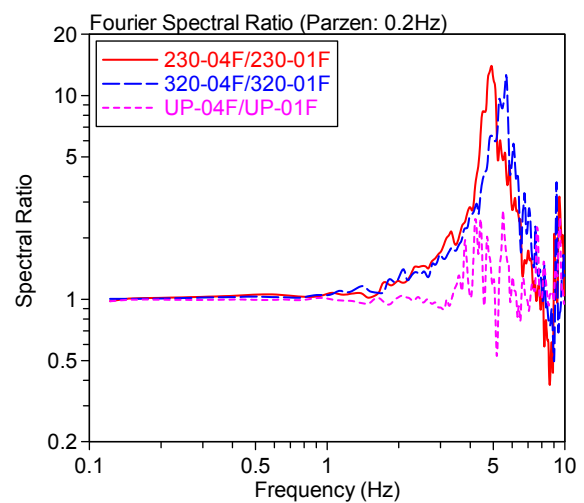


図 3.31 小千谷小学校(OJP)の記録のフーリエスペクトル比(4F/1F)

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ので、以下の比較では小千谷小学校の記録の水平成分を K-NET に合わせて東西、南北に変換している。図 3.32 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 3.33 はそれら記録のフーリエスペクトル、図 3.34 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。低振動数領域では概ね同レベルであるが、2 Hz から 6 Hz の振動数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。

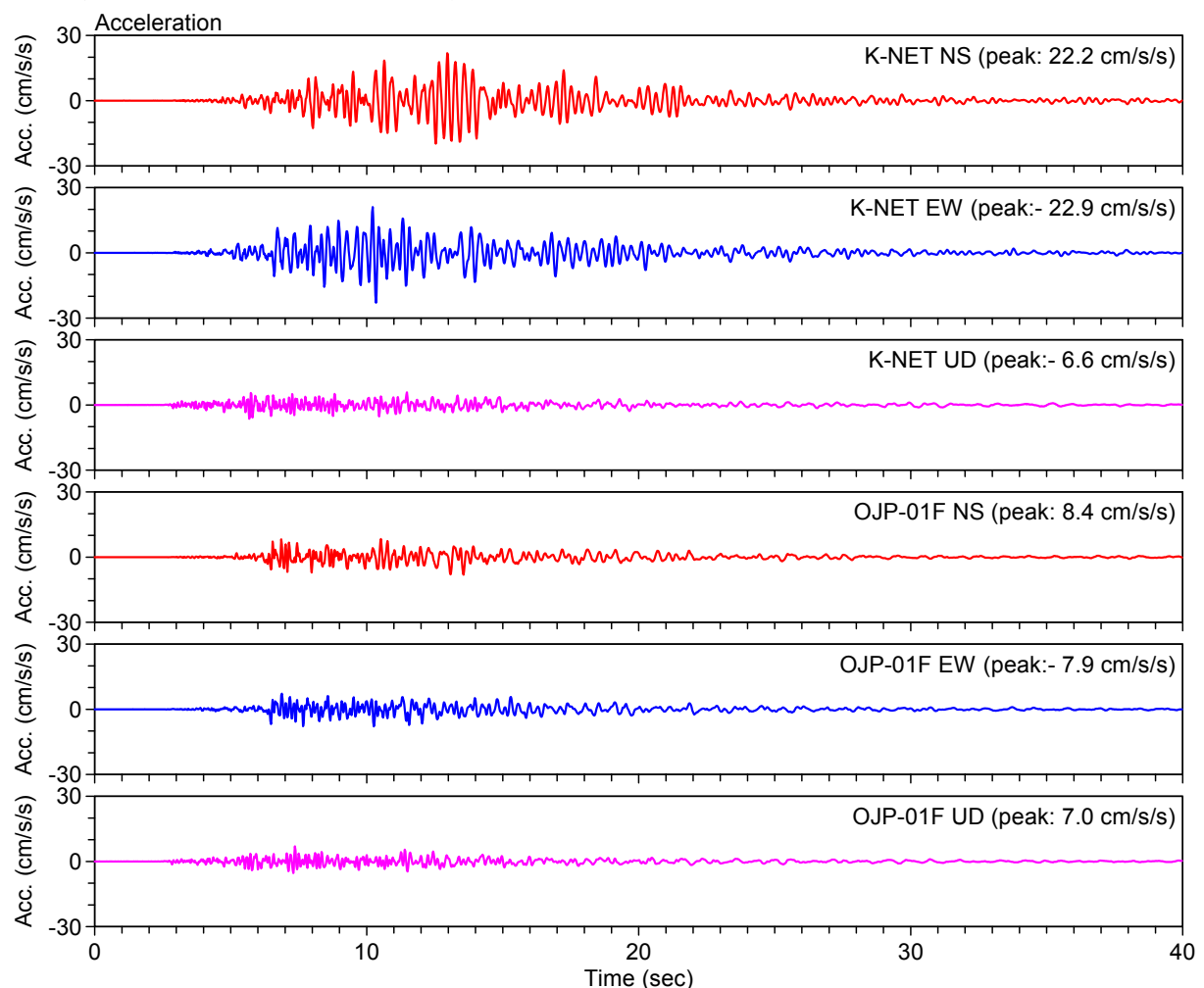


図 3.32 K-NET 小千谷(NIG019: 上段)と小千谷小学校(OJP: 下段)の記録の比較

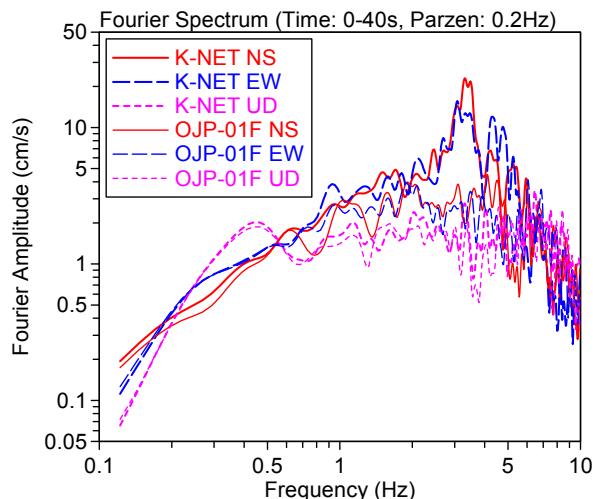


図 3.33 K-NET 小千谷と小千谷小学校の記録のフーリエスペクトル

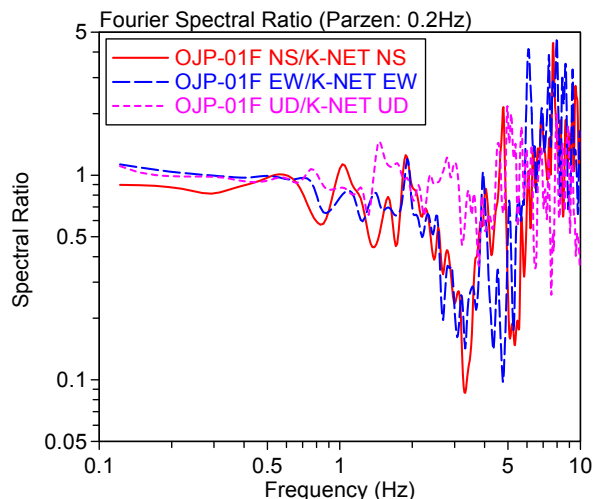


図 3.34 小千谷小学校 1 階/K-NET 小千谷 (1F/GL) のフーリエスペクトル比

(3) 小千谷市役所

小千谷小学校で得られた余震記録を図 3.35 に示す。地盤上の記録から算出した計測震度は 2.7 である。上から地盤上、建物 1 階、建物 R 階(5 階相当)の加速度となっている。“210”成分が建物短辺方向に対応する。1 階の水平最大加速度は地盤上の約半分、また建物頂部の水平最大加速度は 1 階の約 2 倍となっている。

全ての加速度記録のフーリエスペクトルを図 3.36 に示す。また図 3.37 は 1 階の地表に対する(1F/GL)、図 3.38 は 5 階の地表に対する(5F/GL)、図 3.39 は 5 階の 1 階に対する(5F/1F)フーリエスペクトル比である。1F/GL の水平成分のフーリエスペクトル比には 3 Hz から 7 Hz 辺りに低下が認められ、これが最大加速度の差となって表れている。5F/GL のフーリエスペクトル比には水平両方向とも 2.4 Hz に、また 5F/1F のフーリエスペクトル比には水平両方向とも 2.5 Hz に明瞭なピークが表われており、建物の固有振動数と思われる。5F/GL と 5F/1F のピーク周波数の違いは地盤と建物の相互作用効果によると思われるが、その影響は大きくはない。

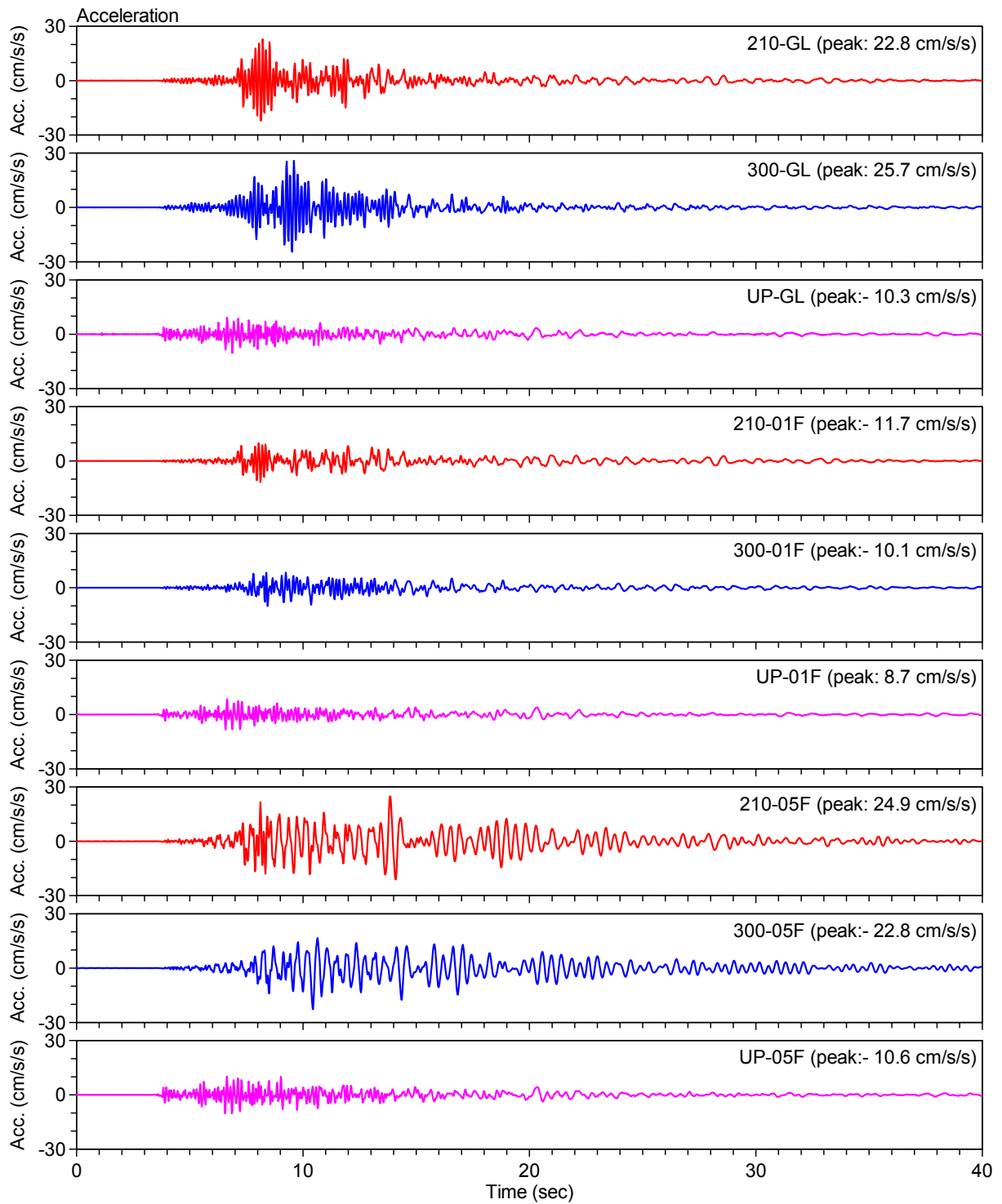


図 3.35 小千谷市役所(OJC)で得られた余震記録。上段が地表、中段が1階、下段がR階(5階相当)

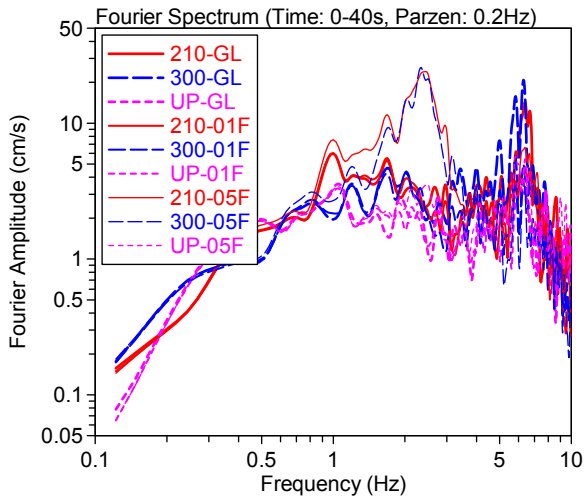


図 3.36 小千谷市役所(OJC)の記録のフーリエスペクトル

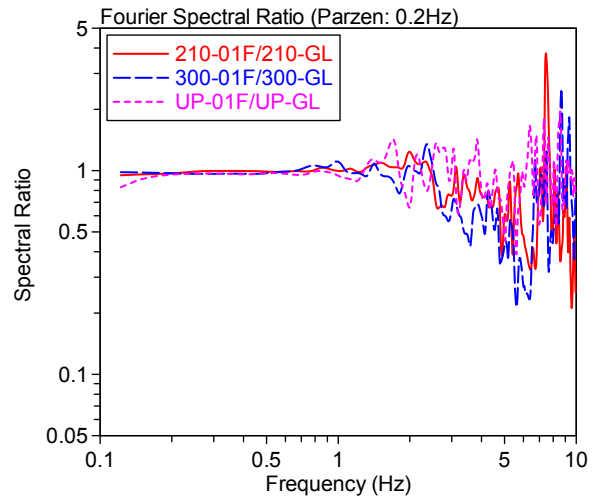


図 3.37 小千谷市役所(OJC)の記録のフーリエスペクトル比(1F/GL)

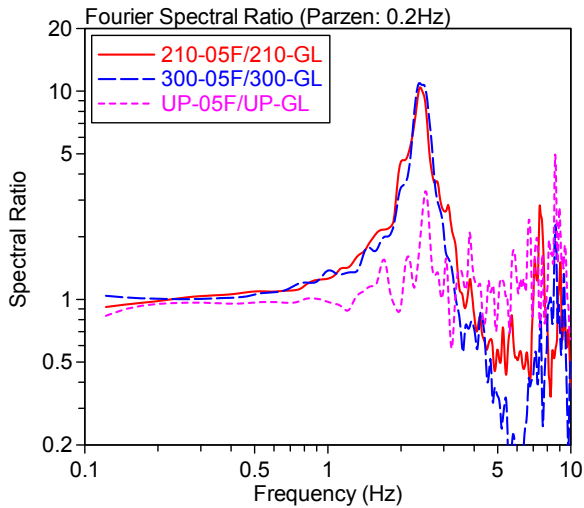


図 3.38 小千谷市役所(OJC)の記録のフーリエスペクトル比(5F/GL)

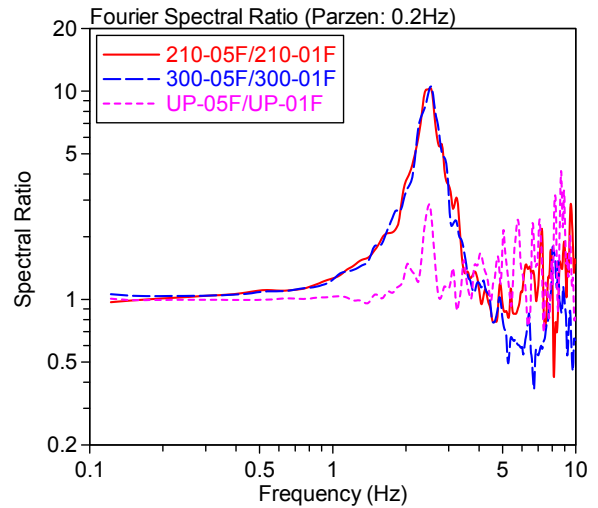


図 3.39 小千谷市役所(OJC)の記録のフーリエスペクトル比(5F/1F)

3.5 構造物の応答の観点から見た地震動の特性

3.3 節では、観測された地震動の最大値、応答スペクトルなどの基本的特性について考察した。また、小千谷地域の地盤上の記録と近傍建物内部の記録の比較を通して、実際に各建築物へ作用した実効入力地震動について検討し、本震よりもレベルの小さい余震記録で見ると、これらの差は相当に大きく、いわゆる建物への実効入力地震動の評価はさらなる調査・検討が必要であることがわかった。本節では、記録された地震動は、建築物の応答という観点からどのような強度レベルであるのかを検討した。

3.5.1 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を用いて、地震動と被害の関係を検討する。図 3.40 および図 3.41 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、 $D_s=0.5$ 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。

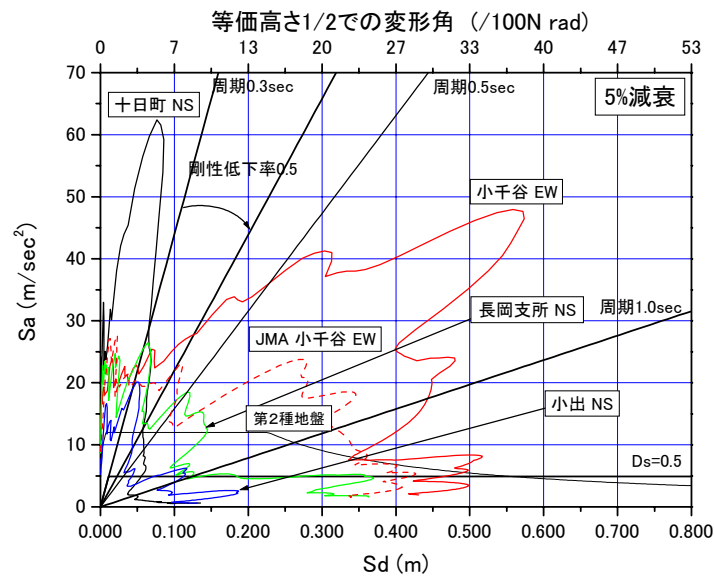


図 3.40 5%減衰での要求曲線の比較

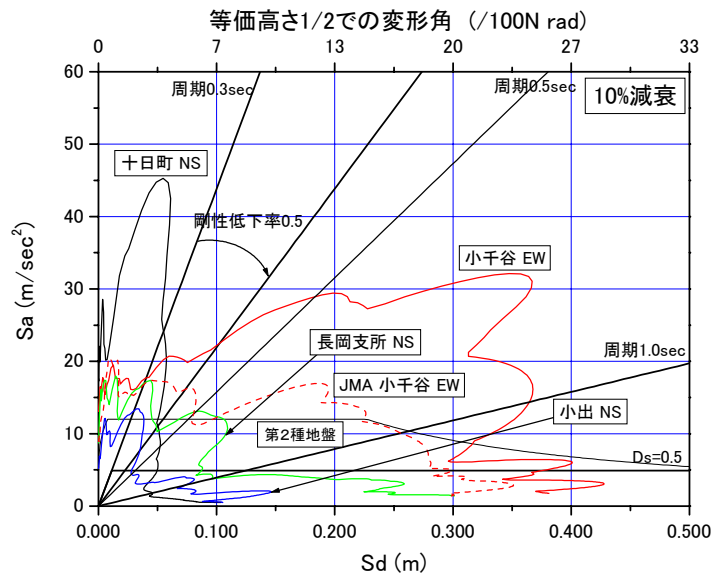


図 3.41 10%減衰での要求曲線の比較

3.5.2 エネルギースペクトルによる検討

図 3.42 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 ($V_E = \int \ddot{x}_0 \cdot \dot{x} dt$) 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。

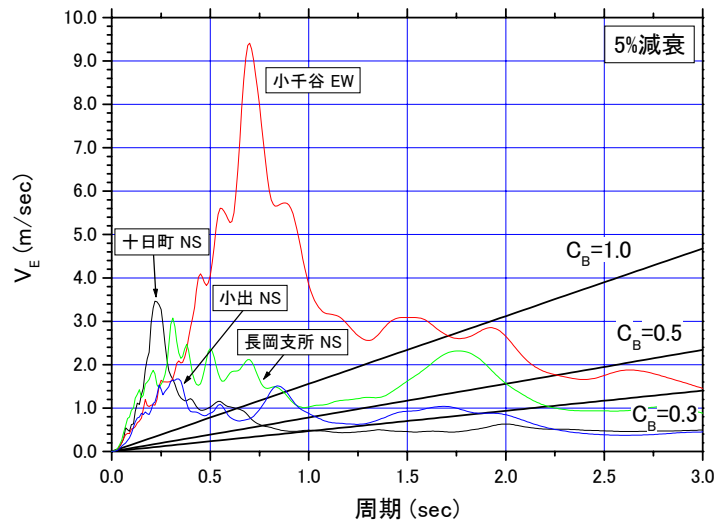


図 3.42 主要 4 波の入力エネルギー速度換算値

3.5.3 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 3.7 に示す。また、各ケースでのせん断力-水平変形関係を図 3.43 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 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 3.44 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

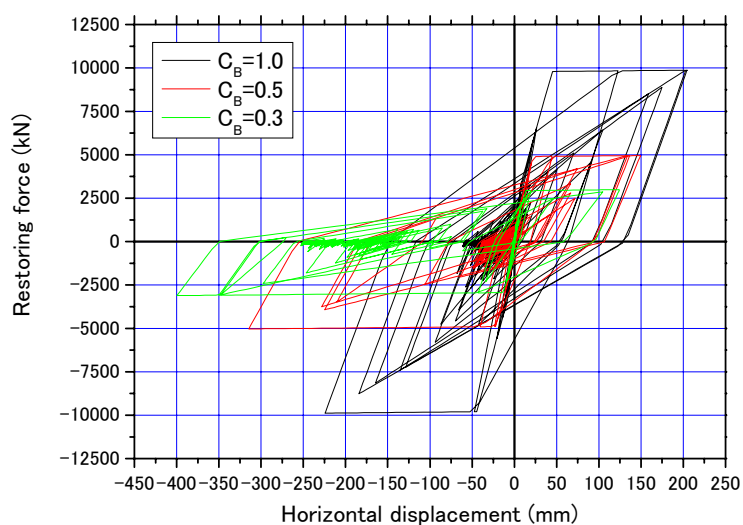


図 3.43 セン断力ー水平変形関係 (T=0.3、K-NET 小千谷 EW 成分の場合)

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

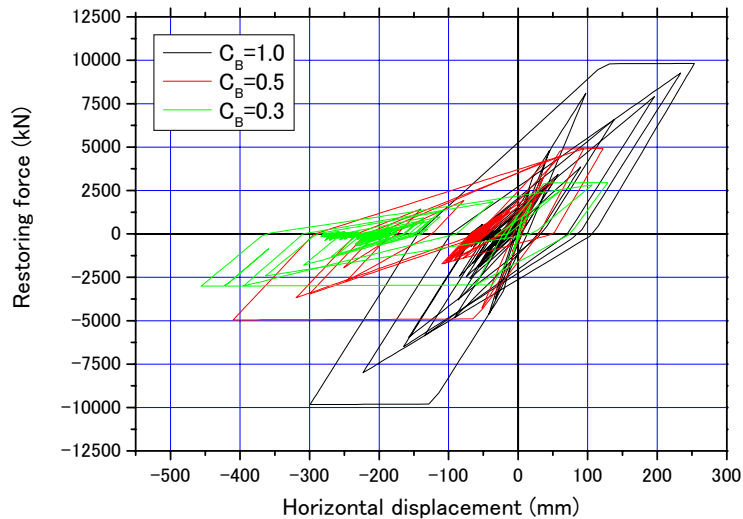


図 3.44 せん断力－水平変形関係 (T=0.5、K-NET 小千谷 EW 成分の場合)

表 3.9 塑性率がほぼ 1 となる入力レベル (K-NET 小千谷 EW 成分の場合)

		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 3.45 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 3.46 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。

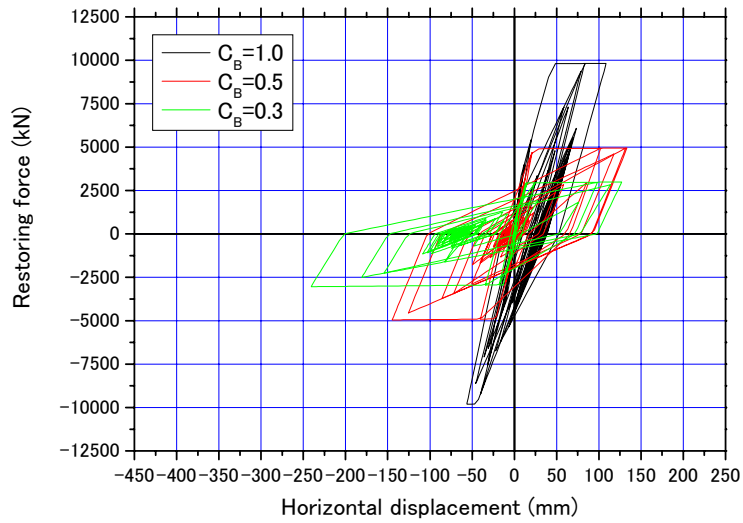


図 3.45 せん断力－水平変形関係 (T=0.3、JMA 小千谷 EW 成分の場合)

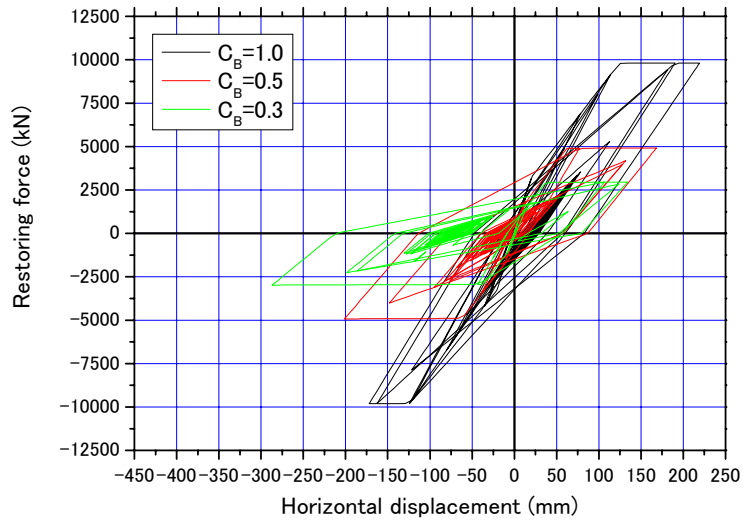


図 3.46 せん断力－水平変形関係 (T=0.5、JMA 小千谷 EW 成分の場合)

表 3.10 塑性率がほぼ 1 となる入力レベル (JMA 小千谷 EW 成分の場合)

		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

3.6 現在の所見と今後の検討項目

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が、これら以外の地点での最大速度はそれほど大きくない。
- (7) K-net 小千谷と JMA 小千谷の記録を 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、小千谷での両記録が上回るか同等であるが、周期 1 秒以上では、神戸の記録が大きく上回っている。
- (8) 震源近傍の小千谷地域で地盤上の観測記録を用いた、限界耐力計算で規定される建築物の要求曲線、エネルギースペクトルおよび弾塑性応答により、建築物への影響という観点から地震動について検討すると、地盤上の加速度記録がそのまま作用したと仮定すると、0.3 秒や 0.5 秒の弾性周期を有する比較的短周期の建築物の応答が大きくなり、大きな構造的被害が発生する結果が得られた。観測記録の加速度振幅レベルは極めて大きい、局所的な表層地盤の増幅効果や建築物への作用地震動、いわゆる有効入力動の検討が必要である。
- (9) 余震が頻発していることから、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ている。この 3 地点は、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る地点である。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ている。現段階では、必ずしも十分な考察を行っていないが、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、加速度波形に差異が認められる。また、小千谷市役所の庁舎 1 階と地盤上での記録の比較でも、庁舎 1 階の記録との有意な差を検出している。

今後検討すべきことあるいは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、今後多くのデータが公表されるものと考えられるので、

それらの記録を収集し、強震記録の分析を行なう。

- (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。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り、これらの高いレベルの地震動が建築物にそのまま入力したと仮定すると、大きな被害が想定される。しかし、観測点周辺の建築物の被害は比較的軽微であることもあり、建築物への入力地震動および上部構造の性能の観点から、地震被害に関する総合的な検討が必要である。建築物への入力地震動については、本震記録や余震記録の分析あるいは微動測定の結果などを踏まえて、表層地盤特性の影響や建築物への有効入力動の評価等の検討を進める予定である。
- (3) 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。具体的には表層地質、表層地盤の特性に関する定量的データの収集と整理を行い、地震動の増幅特性の評価を行う。(非線形挙動、液状化などとの関連からも検討が必要。)
- (4) 強震記録を分析し、震源近傍地震動の評価法の高度化への資料をまとめる。
- (5) 構造物内への強震計の設置がなかったため、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。