

新潟県中越地震の被災地域における微動記録と強震動記録について（報告）

芝浦工業大学（紺野，諏訪，田辺）・工学院大学（久田，鱒沢，柴山，塚本，佐藤，松井，市居，小澤，吉田）・明星大学（年縄，矢島）・大成建設（吉村，堀井）

1．はじめに

芝浦工業大学，工学院大学，明星大学，大成建設のグループは，2004年10月29日から11月1日にかけて，新潟中越地震（2004/10/23 17:56, Mj6.8）の被害調査を行った．被害調査の一環として，震度計や地震計が設置されている地点，上越新幹線の脱線現場付近の地盤，地震断層が現れたと指摘¹⁾される小平尾断層の一部などで常時微動観測を行った．これらの観測目的は，微動から得られる地盤特性と計測震度や脱線との関係，地震断層が現れた地盤との関係などについて検討することである．ただし，本報告ではこれらの目的を達成するにはいたっていない．これらは今後の課題として残し，今回は主に微動から得られた各地点の地盤特性やこれらと地震記録との関係についての検討結果を報告する．

2．微動観測概要

微動観測は，加速度計（GPL-6A3P，アカシ社製）を用いて，1点3成分観測を行った．観測は，各地点で180秒間，サンプリング周波数200Hz，ローパスフィルタ50Hzで行った．観測点概要，位置をそれぞれ表1，図1に示す．なお，地震計あるいは震度計の設置点では，それらの近傍で微動観測を行った．なお，付録Aに微動観測点の写真を載せてある．

表1 微動観測点概要

No.	観測場所	観測日時	住所	備考
1	千手小学校	2004 10 30 06:51	長岡市千手 2-8-1	K-NET NIG017
2	防災科研	2004 10 30 08:36	長岡市栖吉町前山 187-6	K-NET NIG028
3	長岡市役所	2004 10 30 07:31	長岡市幸町 2 - 1 - 1	気象庁地震計
4	小千谷市役所	2004 10 30 15:47	小千谷市城内 2-7-5	
5-1	川口町役場（地盤）	2004 10 31 07:39	北魚沼郡川口町大字川口 1974-26	気象庁震度計
5-2	川口町役場（屋上）	2004 10 31 07:53	北魚沼郡川口町大字川口 1974-27	
6	守門村役場	2004 11 01 08:18	北魚沼郡守門村須原 520	気象庁震度計
7	広神村役場	2004 11 01 09:24	北魚沼郡広神村大字今泉 1488-1	気象庁震度計
8	気象庁地震観測点	2004 11 01 11:06	北魚沼郡広神村米沢	気象庁地震計
9	小出町役場	2004 11 01 13:28	北魚沼郡小出町小出島 130-1	気象庁震度計
10	堀之内町役場	2004 11 01 14:22	北魚沼郡堀之内町大字堀之内 130	気象庁震度計
11	小平尾断層 01	2004 11 01 12:03	北魚沼郡広神村小平尾	
12	小平尾断層 02	2004 11 01 12:26	北魚沼郡広神村小平尾	
13	新幹線（東京側）	2004 10 30 13:22	長岡市渡沢町	脱線開始付近
14	新幹線（中間）	2004 10 30 14:08	長岡市十日町	
15	新幹線（長岡側）	2004 10 30 13:06	長岡市小山	停止位置付近
16	長岡工専	2004 10 30 10:01	長岡市西片貝町 888	

連絡先

紺野克昭（芝浦工業大学土木工学科）TEL03-5476-3046 FAX03-5476-3166 konno@sic.shibaura-it.ac.jp

3．微動の解析結果

各観測点の微動のフーリエスペクトル，H/V スペクトルを求めた．スペクトル解析は，180 秒間の波形の中で安定している 20.48 秒間，4 区間を選び，FFT を用いて行っている．平滑化には，バンド幅 0.9Hz の Parzen ウィンドウを用いている．以下に各観測点のフーリエスペクトル，微動 H/V スペクトルを図 2，図 3 に示す．微動 H/V スペクトルの周期 0.1 秒から 2 秒までの最大ピークの値をピーク値，その周期をピーク周期とし，表 2 に示す．

微動 H/V スペクトルから気づくことを以下にまとめてみる．

- ・ 川口町役場の屋上の微動 H/V スペクトルから，建物の固有周期は，短辺方向で 0.33 秒，長辺方向で 0.30 秒と推定される．この建物は RC 造 3 階建であるので，妥当な推定結果と考えられる．一方，地盤上の微動 H/V スペクトルは NS 成分と EW 成分で大きく異なっているが，建物の固有周期付近には両成分ともピークはなく，建物と地盤の共振現象は顕著ではなかったと推測される．
- ・ 全観測点で周期 0.5 付近にピークが見られる．しかし，NS/UD 成分にだけ卓越してみられる傾向があり，特に No.5～12 ではその傾向が顕著である．現時点では，推測の域を脱しないが，不整形地盤や地質の異方性などがその要因と考えている．
- ・ 新幹線の脱線開始付近（No.13）のピーク周期は約 0.3 秒で停車位置付近（No.15）ではピーク周期は 0.2 秒弱と短くなっている．また，両者の中間付近（No.14）では明瞭なピークが見られない．図 4 に地質断面を示しており，図から読み取った沖積層厚は No.13 で 13.7m，No.14 で 6.6m，No.15 で 11.5m である．ピーク周期の長短と沖積層厚の増減は概ね対応していると考えられる．なお，1/4 波長則を用いて沖積層の平均的な S 波速度を求めてみると No.13 で 203m/s，No.15 で 271m/s である．両地点とも比較的 S 波速度が速いが，これは沖積層の中で砂礫層が占める割合が大きく，特に No.15 では沖積層厚の約半分が砂礫層となっているためと考えられる．

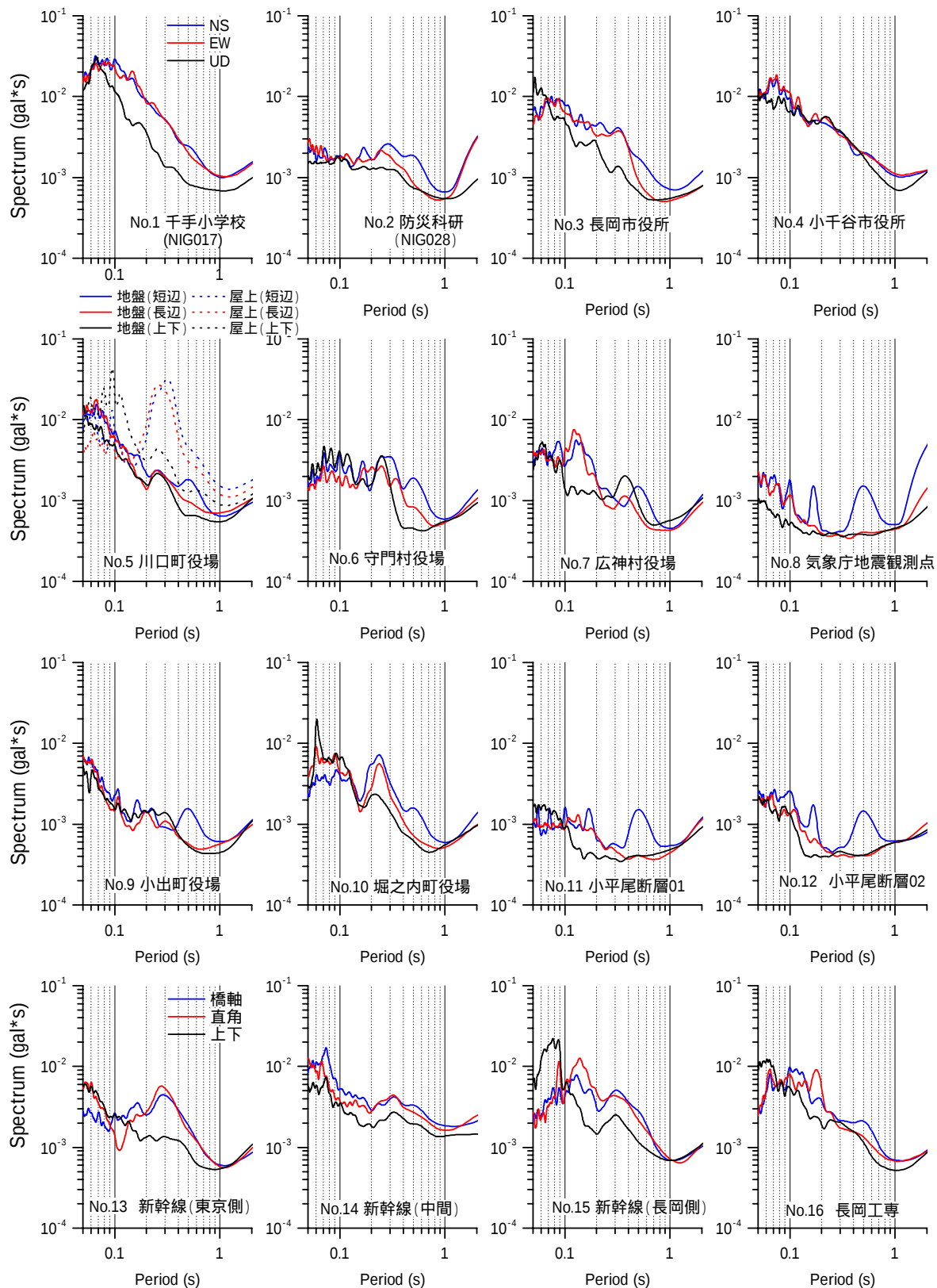


図2 各地点の微動 H/V スペクトル

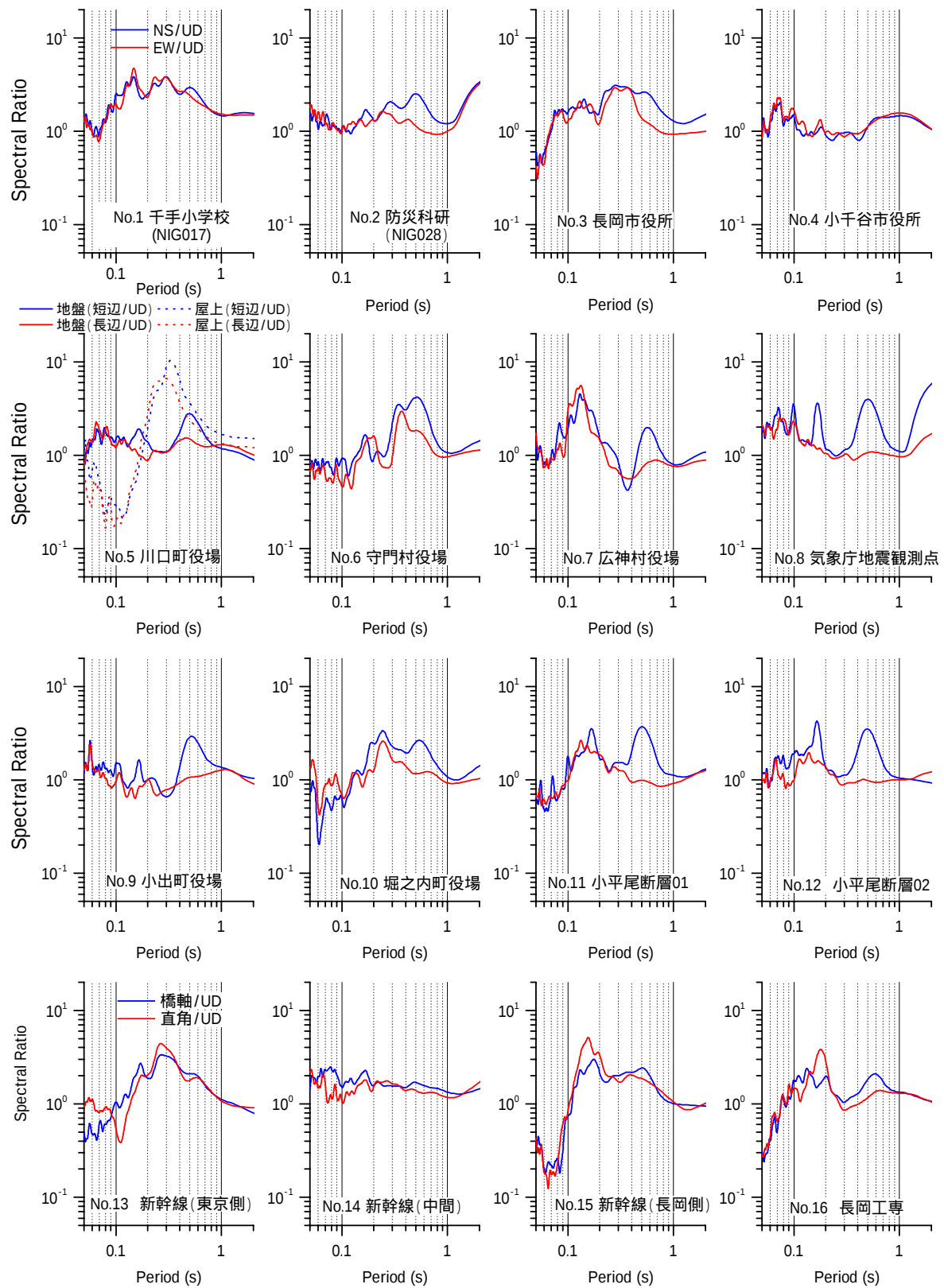


図3 各地点の微動 H/V スペクトル

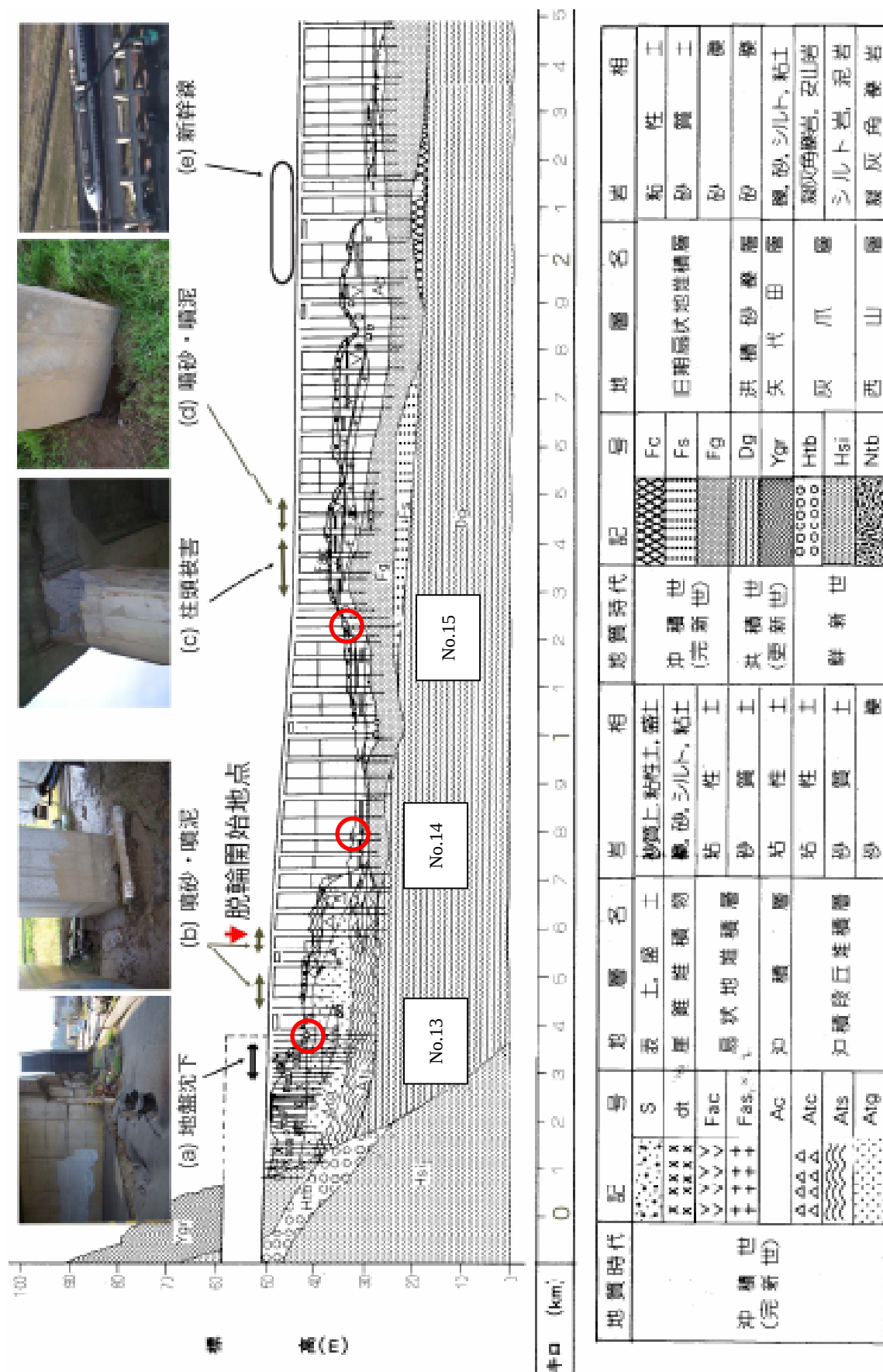


図4 上越新幹線脱線付近の地質断面と微動観測点（○印）
 （参考文献²⁾に時松ら³⁾が加筆修正したものに更に加筆修正）

表 2 各地点の微動 H/V スペクトルのピーク周期，ピーク値

No.	観測場所	ピーク周期 (NS)(sec)	ピーク周期 (EW)(sec)	微動ピーク値(NS)	微動ピーク値(EW)
1	千手小学校(NIG017)	0.30	0.15	3.9	4.7
2	防災科研(NIG028)	0.50	0.24	3.0	1.8
3	長岡市役所	0.28	0.28	3.1	2.9
4	小千谷市役所	1.02	0.98	1.5	1.6
5-1	川口町役場(地盤)	0.50	0.47	2.8	1.5
5-2	川口町役場(屋上)	0.33	0.30	10.3	6.6
6	守門村役場	0.51	0.37	4.2	3.0
7	広神村役場	0.13	0.13	4.6	5.6
8	気象庁地震観測点	0.50	0.10	5.0	2.3
9	小出町役場	0.53	1.08	2.9	1.3
10	堀之内町役場	0.24	0.24	3.4	2.6
11	小平尾断層 01	0.50	0.13	3.7	2.7
12	小平尾断層 02	0.17	0.14	4.2	2.0
13	新幹線(東京側)	0.27	0.27	3.3	4.4
14	新幹線(中間)	0.17	0.17	2.3	1.8
15	新幹線(長岡側)	0.18	0.17	3.0	5.1
16	長岡工専	0.13	0.18	2.4	3.8

注) 川口町役場(地盤, 屋上)は建物短辺方向を NS, 長辺方向を EW の列に表示している。

注) 新幹線(東京側, 中間, 長岡側)は橋軸方向を NS, 橋軸直角方向を EW の列に表示している。

4. 地震記録の解析

今回、微動観測を実施した地点で本震(表 3)の地震記録が入手できたのは、No.1, No.2, No.3, No.8 の 4 観測点である。各観測点の加速度波形と速度波形を図 5 に示す。表 4 に各観測点の計測震度、最大加速度、最大速度を示す。千手小学校と長岡市役所の直線距離は約 600m と近いので、加速度波形や速度波形は類似していることが分かる。次に、速度応答スペクトル($h=5\%$)を図 6 に示す。千手小学校と長岡市役所の応答スペクトルを比較すると、周期 1 秒程度以上では 3 成分とも同様の応答スペクトルであるが、周期 1 秒程度以下では、水平動の応答スペクトルは 2 地点で異なることが分かる。これは表層付近の S 波速度構造の差異によるものと考えられる。防災科研の応答スペクトルは、他の 3 地点にくらべ大きく、特に周期 1.5 秒付近で上下動成分が大きいことが特徴的である。次に、速度応答スペクトルのピークと微動 H/V スペクトルのピークを比較するため両者を載せた図を図 7 に示す。図中の矢印は、微動 H/V スペクトルのピークとこれに対応していると思われる応答スペクトルのピークを示したものである。いずれも、長周期化しており、地盤の非線形化が生じたと考えられる。なお、No.8 の気象庁地震観測点の微動 H/V スペクトルにおいて NS 成分にだけみられるいくつかのピークがあったが、応答スペクトルにもこれらに対応するピークがあり、同様に NS 成分にだけ表れている。したがって、地下構造の不整形性、あるいは地質の異方性に起因していると考えられる。

ところで、図 8 に兵庫県南部地震の神戸海洋気象台の速度応答スペクトルを載せてある。神戸海洋気象台の応答スペクトルに比べると、今回、検討した 4 地点の震動レベルは小さいことが分かる。

強震動の場合は、構造物も非線形化する。そこで、非線形応答スペクトルのひとつである所要降伏震度スペクトル⁴⁾を用いて強震動の震動特性を見ることにする。なお、所要降伏震度スペクトルは、2 つの使い方ができる。1 つは塑性率をある値以下に抑えるのに必要な降伏震度を調べるために、もうひとつは、ある降伏震度と等価固有周期をもつ構造物がどれだけ塑性するかを調べるために、使うことができる。兵庫県南部地震の際の神戸海洋気象台および上記の 4 観測点における所要降伏震度スペクトルを

それぞれ図 9, 10 に示す．防災科研の所要降伏震度スペクトルは，神戸海洋気象台に比べ若干小さいものの，ほぼ同レベルにあることが分かる．

表 3 本震の諸元

発生日時	2004/10/23 17:56
規模*	Mj6.8, Mw6.6
震源位置**	37.284N 138.8793E, 深さ 13km
断層長さ**	30km
断層幅**	18km
走向**	211 °
傾斜**	52 °
すべり角***	93 °

*の Mj は気象庁の速報値，Mw は F-net の地震のメカニズム情報より．

**は防災科研，近地地震動記録による新潟県中越地震の震源インバージョン
(<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/news/niigata041023/Inv/index.html>), 2004.12, より．

***は F-net の地震のメカニズム情報より．

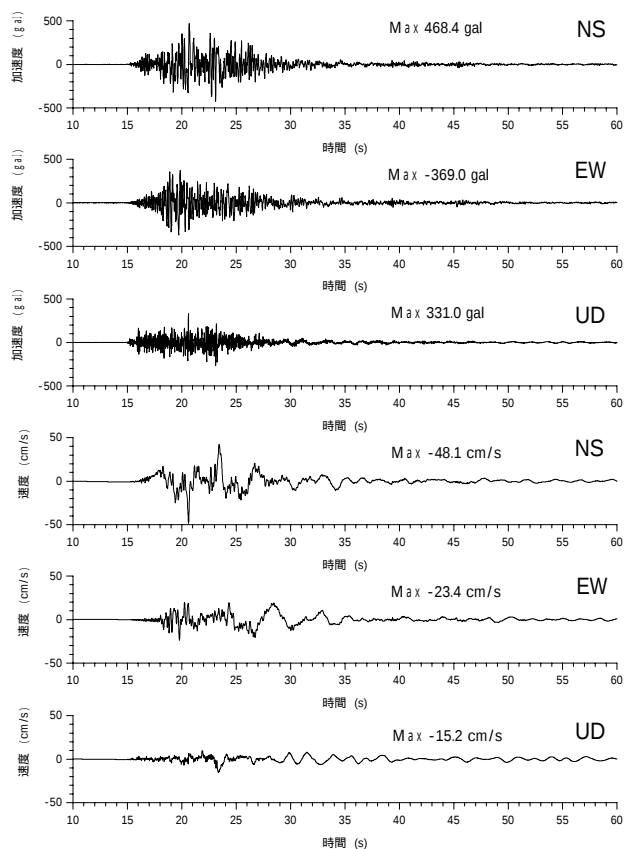
表 4 本震における計測震度，最大加速度（PGA）[単位 gal]，最大速度（PGV）[単位 cm/s]

No.	観測場所	計測震度	PGA(NS)	PGA(EW)	PGA(UD)	PGV(NS)	PGV(EW)	PGV(UD)
1	千手小学校	5.5	468.4	-369.0	331.0	-48.1	-23.4	-15.2
2	防災科研	6.1	870.4	-705.9	-412.0	-64.2	64.8	25.1
3	長岡市役所	5.5	-395.8	430.3	324.5	35.4	24.8	-18.2
5	川口町役場	7*	-	-	-	-	-	-
6	守門村役場	5.7**	845.7***	-	-	-	-	-
7	広神村役場	5.5**	947.1***	-	-	-	-	-
8	気象庁地震観測点	4.7	333.9	286.4	310.8	-15.8	-15.2	-5.4
9	小出町役場	5.2**	377.9***	-	-	-	-	-
10	堀之内町役場	5.9**	488.8***	-	-	-	-	-

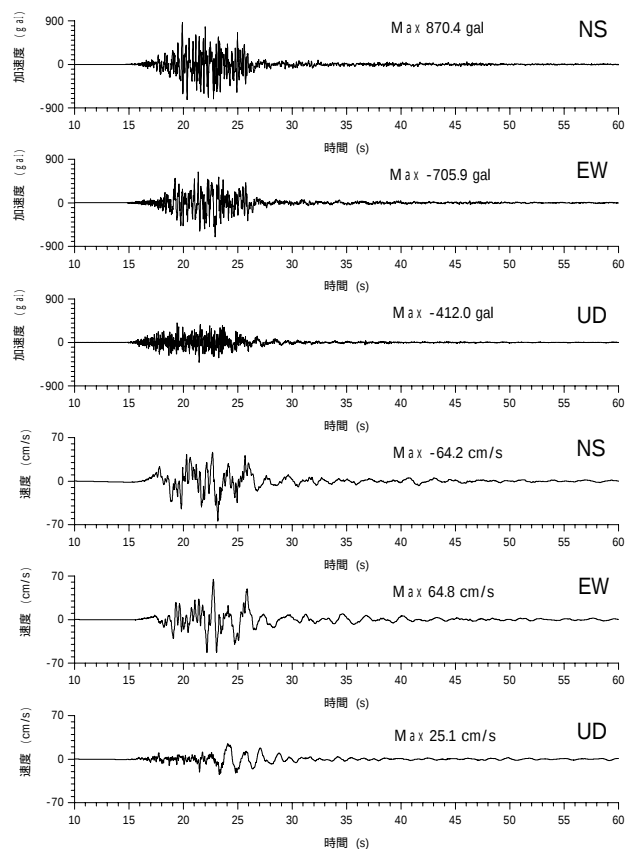
*計測震度の値ではなく，震度階級の値．

**微動測定の際に，震度計から直接読み取った計測震度の値．

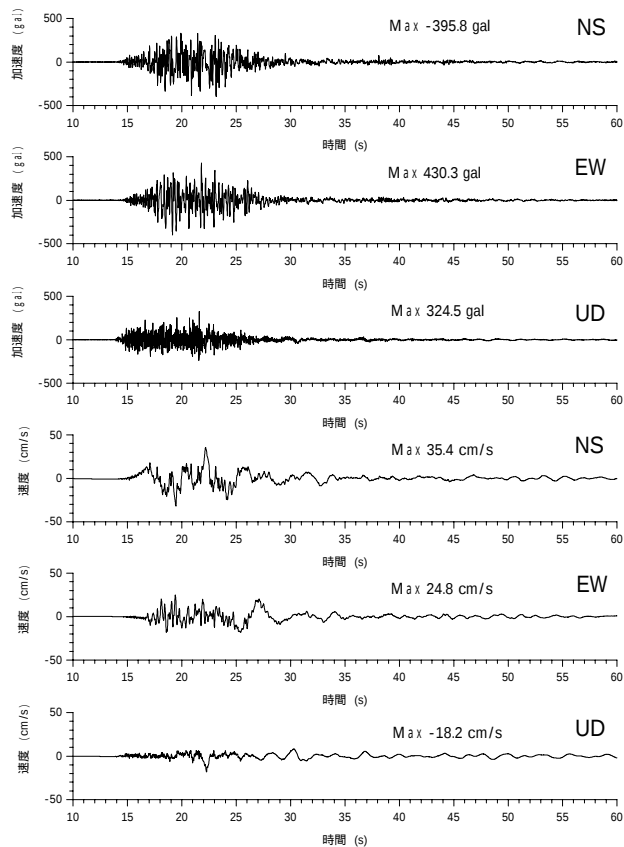
***微動測定の際に，震度計から直接読み取った最大加速度の値．NS の欄に書いてあるが，震度計に加速度値としてひとつだけ表示されていた値．



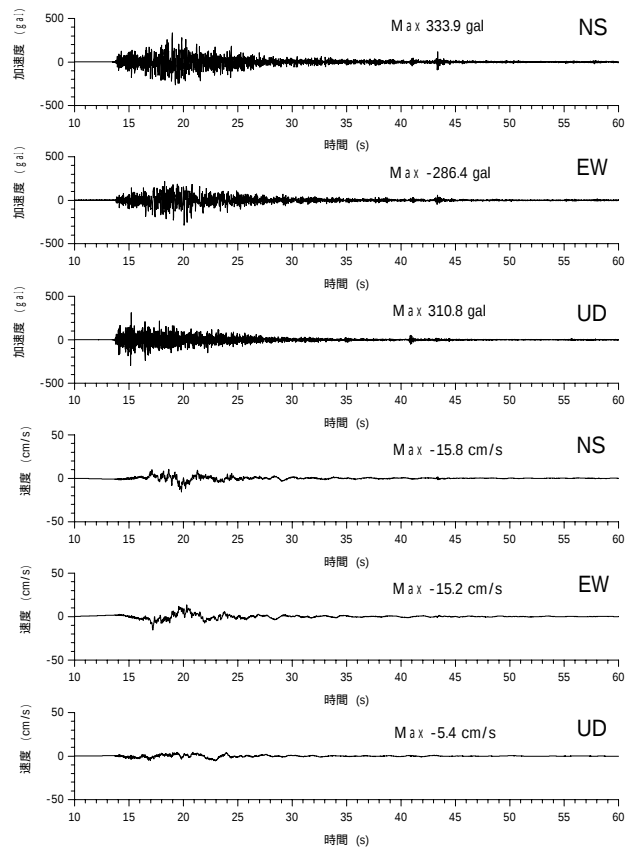
No.1 千手小学校 (NIG017)



No.2 防災科学技術研究所 (NIG028)

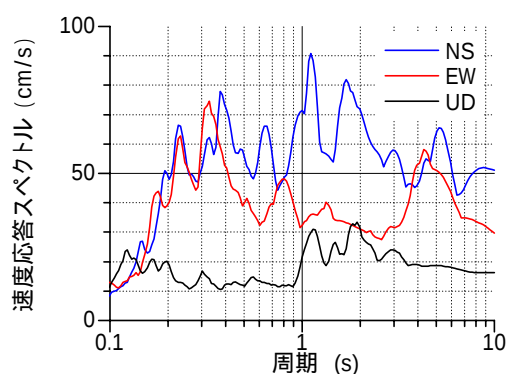


No.3 長岡市役所

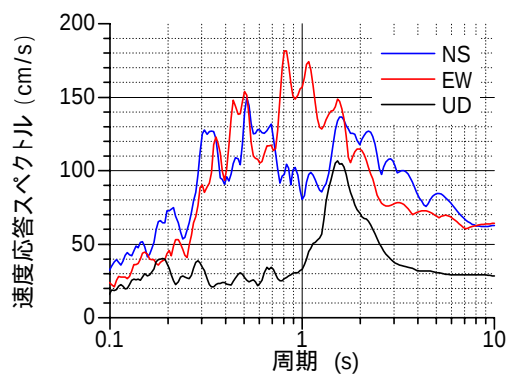


No.8 気象庁地震観測点 (広神村米沢)

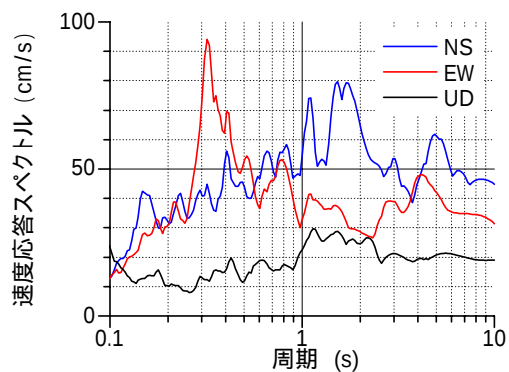
図5 本震 (2004/10/23 17:56) の地震波形



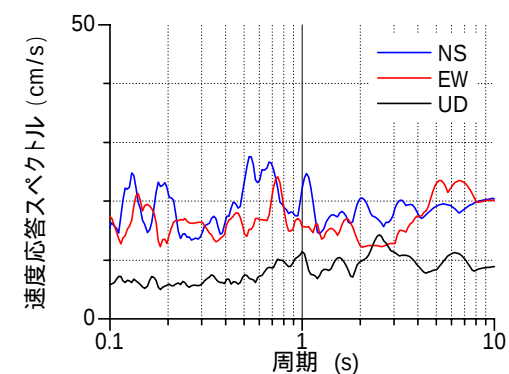
No.1 千手小学校 (NIG017)



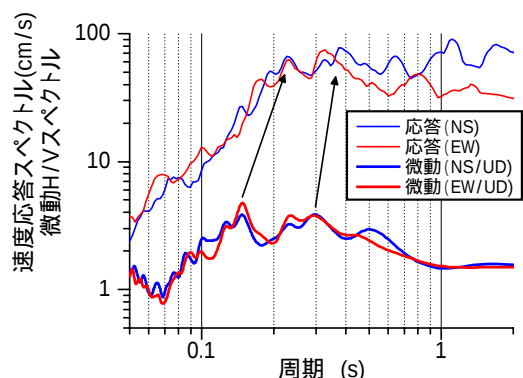
No.2 防災科学技術研究所 (NIG028)



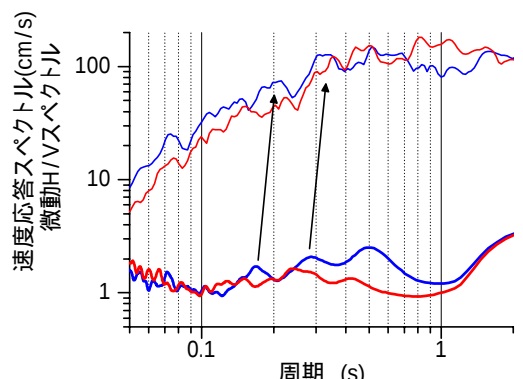
No.3 長岡市役所



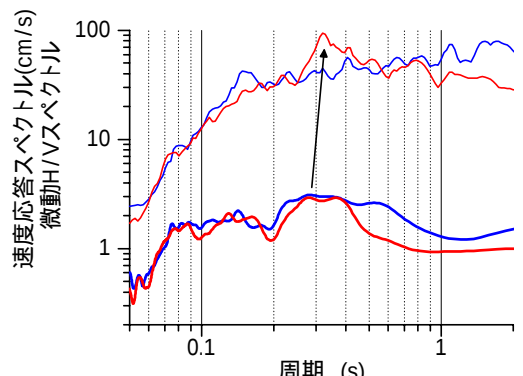
No.8 気象庁地震観測点 (広神村米沢)



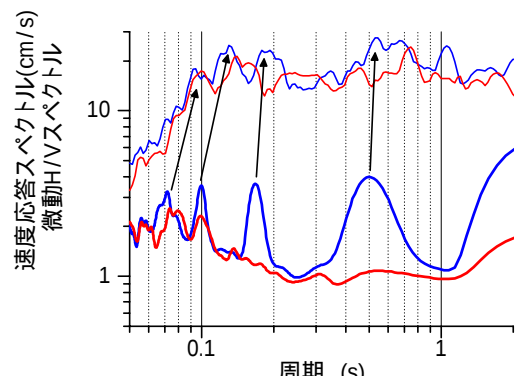
No.1 千手小学校 (NIG017)



No.2 防災科学技術研究所 (NIG028)



No.3 長岡市役所



No.8 気象庁地震観測点 (広神村米沢)

図6 本震の速度応答スペクトル(h=5%)

図7 本震の速度応答スペクトルと微動 H/V スペクトルの比較

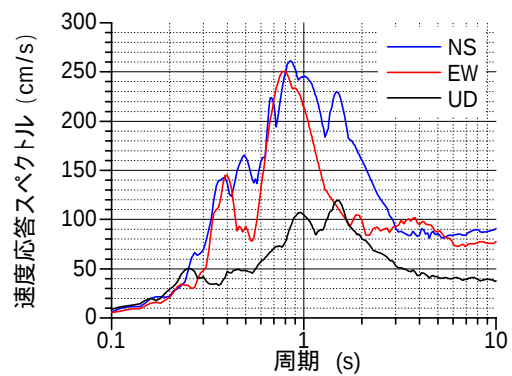


図 8 兵庫県南部地震の神戸海洋気象台における速度応答スペクトル ($h=5\%$)

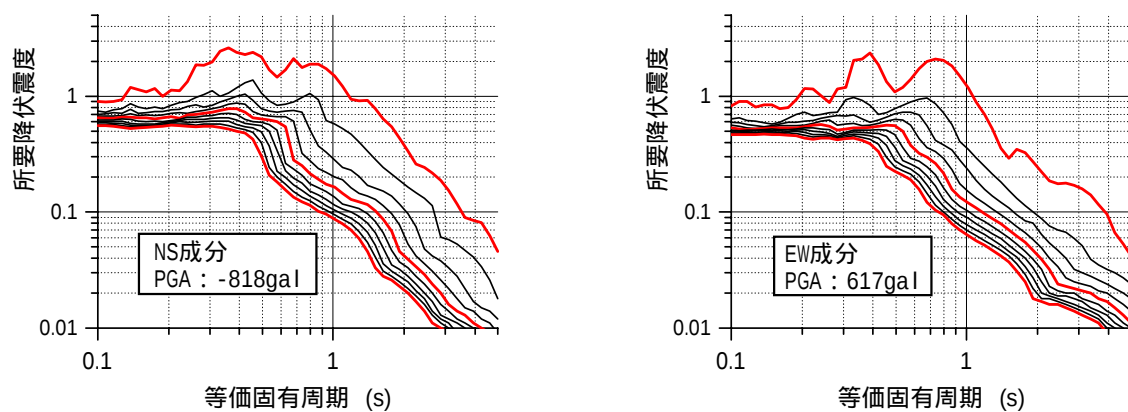


図 9 兵庫県南部地震の神戸海洋気象台における所要降伏震度スペクトル (減衰 $h=0.05$, 第二勾配比 $\alpha=0.05$, 劣化剛性係数 $\beta=0.2$, 履歴モデル: 修正 Clough モデル)
各線は塑性率一定の線で, 上から塑性率=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 となっている .

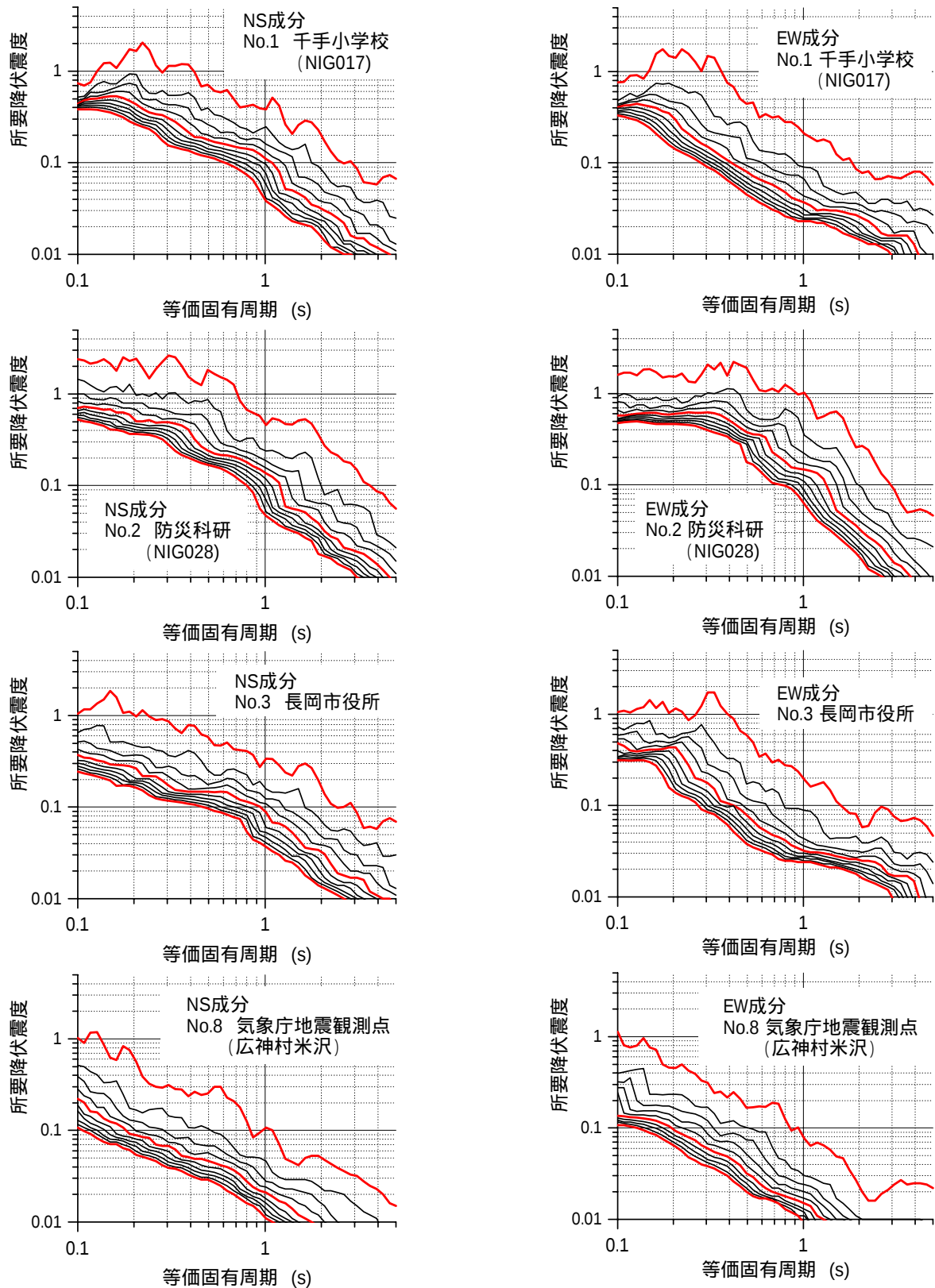


図 10 本震の所要降伏震度スペクトル(減衰 $h=0.05$, 第二勾配比 $\alpha=0.05$, 劣化剛性係数 $\beta=0.2$, 履歴モデル: 修正 Clough モデル)
各線は塑性率一定の線で, 上から塑性率=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10 となっている.

5. まとめ

新潟県中越地震の被災地域で微動観測を行った。この内、4観測点では地震記録との比較を行った。以上をごく簡単にまとめると次の通りである。

- ・ 全観測点で微動 H/V スペクトルの周期 0.5 秒付近にピークがあり、この地域の共通の基盤が成因と考えられる。守門村、広神村、堀之内町、川口町では、この周期 0.5 秒付近のピークは NS 成分に特に顕著に見られ基盤構造の不整形性が示唆される。
- ・ 4 観測点とも微動 H/V スペクトルのピークと本震の速度応答スペクトルのピークには対応が見られた。ただし、後者のピーク周期は長周期側に移っており、地盤の非線形化が生じたと考えられる。
- ・ 4 観測点とも本震の速度応答スペクトルは、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台における速度応答スペクトルに比べて小さいが、所要降伏震度スペクトルで見ると防災科研の震動レベルは、海洋気象台とほぼ同レベルである。

今後は、1 章で述べた目的に沿って研究を進める予定である。また、堀之内町新道島では付録 B に見られるように飛び石現象が見られた。これは、震源近傍の地震動の強さや性質を表すものであり、今後、数値解析あるいは実物実験を通して、震源近傍の地震動強さや性質を推定していく予定である。

謝辞

防災科学技術研究所の K-NET、気象庁の強震記録を使用させて頂きました。また、お忙しい中、震度計や被害状況の説明をして下さった役場の方々、農作業中にも関わらず広神村米沢の地震計の設置場所を案内して下さいました方など、多くの方々に大変お世話になりました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 地質調査総合センター, 新潟県中越地震情報 (http://www.gsj.jp/jishin/chuetsu_1023/index.html), 2004.
- 2) 上越新幹線工事誌 (水上・新潟間), 日本鉄道建設公団新潟新幹線建設局。
- 3) 時松孝次, 鈴木比呂子, 関口徹, 山高円, 2004 年新潟県中越地震調査報告 - 地盤地震動災害 -, 第 92 回工学地震学・地震工学談話会, (<http://www.cuee.titech.ac.jp/events/esse92/essereport92.html>), 2004.11.
- 4) 鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999.

付録 A 微動観測点の写真



No.1 千手小学校（長岡市）



No.2 防災科研（長岡市）



No.3 長岡市役所



No.4 小千谷市役所



No.5-1 川口町役場（地盤）



No.5-2 川口町役場（屋上）



No.6 守門役場



No.7 広神村役場



No.8 気象庁地震観測点（広神村）



No.9 小出町役場



No.10 堀之内町役場



No.11 小平尾断層 01 (広神村)



No.12 小平尾断層 02 (広神村)



No.13 上越新幹線
(脱線開始付近, 東京側, 長岡市
渡沢町)



No.14 上越新幹線
(中間, 長岡市十日町)



No.15 上越新幹線
(停止位置付近, 長岡側, 長岡市
小山)



No.16 長岡工専

付録 B 堀之内町新道島の墓地での飛び石現象



写真 B1 墓地の一角



写真 B2 飛び石現象



写真 B3 ある石



写真 B4 写真 B3 の石を横から撮ったもの