

# 2004年新潟県中越地震の余震観測記録に基づく本震時の震源域の強震動推定

神原 浩 松島 信一 早川 崇 福喜多 輝  
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

## Strong Motion Simulation Using Aftershock Recordings Observed in the Source Region of the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake

by Hiroshi Kambara, Shinichi Matsushima, Takashi Hayakawa and Akira Fukukita

### Abstract

The authors estimated ground motions in the source region of the Mid Niigata Prefecture Earthquake of 2004, using aftershock recordings we observed right after the mainshock. As a result we found that, 1) the observed ground motion at Kawaguchi town hall that marked seismic intensity 7, can be reproduced by a source model with an average level of source spectra in the short period range for inland earthquakes; 2) the level of maximum velocity of ground motions in the area that buildings were heavily damaged, was equivalent or greater than those observed at Kawaguchi town hall; 3) the large peak of response spectra at 1 second for the data at Kawaguchi town hall had been strongly affected by the nature of rupture propagation.

### 概 要

2004年新潟県中越地震の本震時の震源域における地震動を、地震直後に実施した余震観測で得られた記録に基づいて推定した。その結果から、震源域で震度7を記録した川口町役場の観測記録は、短周期レベルが内陸地震の平均的な値となるように定めた震源モデルにより概ね再現できること、震源域で建物に大きな被害が生じた地区では、地震動の最大速度が川口町役場より大きいか同じレベルであったこと、川口町役場の観測記録に見られる周期1秒のピークは震源の破壊伝播が大きく影響している可能性があることが分かった。

### § 1. はじめに

近年、マグニチュード7クラスの内陸直下地震によって震源域を中心に建物被害が生じた事例が頻発している。内陸直下地震は全国のどこにでも発生する可能性があると考えられており、このような地震の震源域における地震動の特徴や建物への影響を明らかにすることは地震防災対策を考える上で重要である。地震動の特徴を分析するために用いられる強震記録は兵庫県南部地震以降に整備された強震観測網により入手しやすくなったが、実際に大地震の震源域で得られた事例は少ない。一方、小地震記録から大地震の地震動が計算できる波形合成法<sup>1)</sup>を用いれば、強震記録が得られなかった地点においても、本震の震源域で発生した余震の観測記録から本震時の強震動を推定することができる。本報告では、計測震度計により初めて震度7が観測された2004年新潟県中越地震において、震源域の地震動特性や建物被害の分析を目的として、地震発生直後に実施した余震観測で得られた記録に基づいて震源域の強震動を推定した結果について示す。

### § 2. 余震観測

2004年新潟県中越地震では震源近傍やその周辺の中小的市町村で建物や地盤に大きな被害が発生した。現在、防災科学技術研究所や気象庁などの強震観測網によって多くの強震記録が得られるようになったが、新潟県中越地震において被害が大きかった地域で観測記録が得られたケースは多くなかった。また、同じ市町村内でも地区によって被害程度が大きく異なるケースが見られ、そのような被害の差の原因が分析できるほど十分に強震記録が得られているわけではない。そこで、著者らは震源域やその周辺で建物被害が報告された地区を対象に、主として小中学校に臨時の観測点を設置し、2004年11月4日から約1カ月間、東京大学地震研究所、消防研究所と合同で余震観測を実施した<sup>2)</sup>。設置した観測点は19箇所、内訳は越路町(1)、長岡市(2)、小千谷市(3)、川口町(8)、堀之内町(2)、十日町市(2)、湯之谷村(1)である。なお、地震発生後、市町村合併により市町村名が改称されたところもあるが、本報告では地名は地震発生当時のものとした。

図-1に余震観測点を防災科学技術研究所の K-NET および KiK-net 観測点と共に示す。図中には後述する地震動推定で用いた本震の断層モデルと余震の震源メカニズムをあわせて示している。余震観測点のうち川口町については、川口町役場周辺で木造家屋の被害が集中した役場の北東側の道路を中心とした約 1km×0.3km の領域に、地震動の空間的な差を調査するために 3 箇所設置した。また、川口町に点在する居住地区で被害の顕著であった武道窪に 2 箇所、田麦山 (田麦山小) と木沢 (木沢公民館) にそれぞれ 1 箇所設置し、被害が軽微であった西川口 (川口小) にも比較として 1 箇所設置した。川口町以外は、建物や土木構造物の被害が確認された地域として、北は越路町 (越路中)・長岡市 (岡南中) から南は十日町市 (十日町小他)・堀之内町 (堀之内町役場, 宇賀地小) までを対象にして、既存の地震観測点の間を埋めるように、あるいは比較の為に地震観測点の近傍に余震観測点を設置した。全ての観測点で機動型強震計<sup>3)</sup>を使用した。余震観測で得られた主な地震記録を表-1に示す。このうち震源の位置が本震の破壊開始点に近い 2004 年 11 月 6 日 22 時 5 分の地震について、加速度波形と減衰定数 5% の擬似速度応答スペクトルを図-2に示す。図から、川口町役場とその周辺の川口町 A と川口町 B では、地震動の卓越周期に大きな差はないが、振幅は西側の川口町

害が確認された地域として、北は越路町 (越路中)・長岡市 (岡南中) から南は十日町市 (十日町小他)・堀之内町 (堀之内町役場, 宇賀地小) までを対象にして、既存の地震観測点の間を埋めるように、あるいは比較の為に地震観測点の近傍に余震観測点を設置した。全ての観測点で機動型強震計<sup>3)</sup>を使用した。余震観測で得られた主な地震記録を表-1に示す。このうち震源の位置が本震の破壊開始点に近い 2004 年 11 月 6 日 22 時 5 分の地震について、加速度波形と減衰定数 5% の擬似速度応答スペクトルを図-2に示す。図から、川口町役場とその周辺の川口町 A と川口町 B では、地震動の卓越周期に大きな差はないが、振幅は西側の川口町

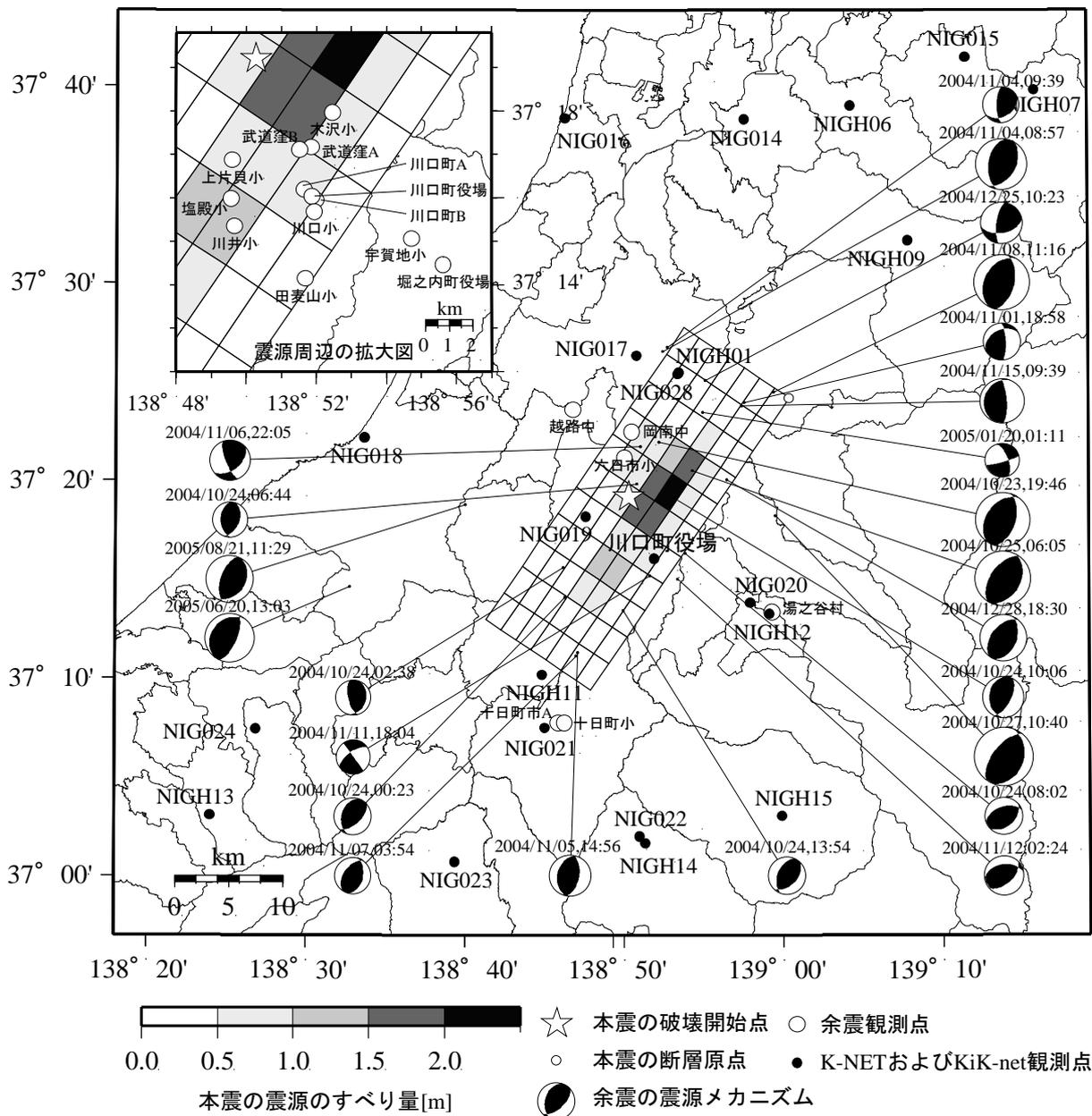
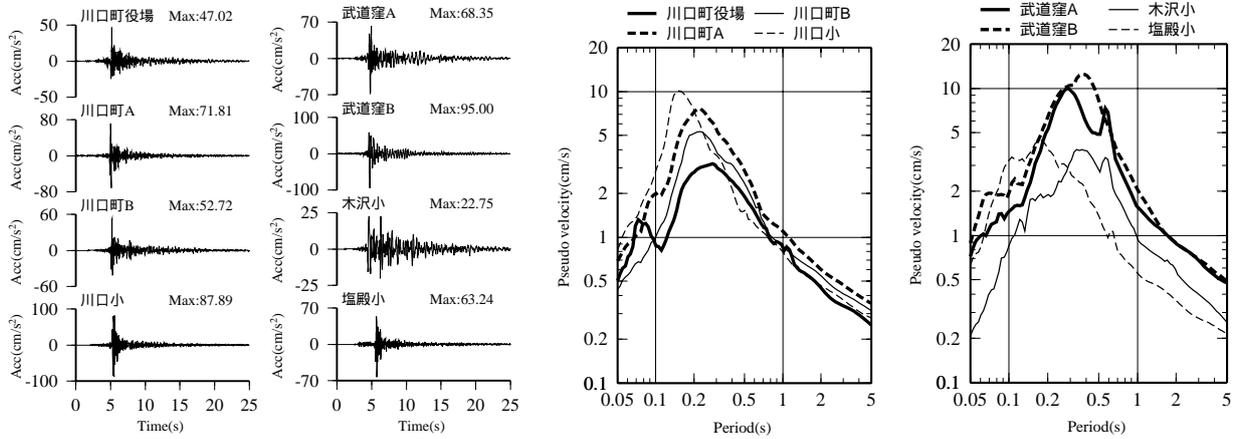


図-1 余震観測点、既存の地震観測点および地震動の計算で用いた要素地震の震源<sup>8)</sup>と本震の震源モデル<sup>5)</sup>の位置

表一 余震観測で得られた主な地震記録

発震時刻	M <sub>w</sub>	震源位置			最大加速度* [cm/s <sup>2</sup> ]								
		北緯 [°N]	東経 [°E]	深さ [km]	川口町 役場	川口町 A	川口町 B	武道窪 A	武道窪 B	田台山	木沢小	川口小	塩殿小
2004/11/05,14:56	4.1	37.189	138.785	8	20/40	49/94	-	-	44/43	73/150	-	59/71	-
2004/11/06,02:53	4.9	37.374	138.960	5	44/32	25/28	40	-	46/38	58/37	62/35	45/63	-
2004/11/06,06:23	3.6	37.369	138.964	5	11/7	5/9	20	-	12/16	34/12	8/5	16/10	-
2004/11/06,15:16	4.3	37.383	138.962	5	24/32	19/29	48	19/3	47/54	28/30	21/29	59/116	114/80
2004/11/06,18:25	4.1	37.168	138.699	5	6/5	8/9	14	11/2	14/11	-	-	-	18/13
2004/11/06,22:05	4	37.362	138.850	5	40/47	30/72	53	69/16	95/79	-	22/23	88/50	46/63
2004/11/07,03:54	3.7	37.186	138.783	5	10/11	-	29	9/2	20/21	-	13/13	-	25/27
2004/11/08,01:55	3.5	37.264	138.866	5	215/171	-	116	56/11	46/50	114/48	54/53	177/111	68/56
2004/11/13,07:24	3.8	37.177	138.759	8	3/3	-	6	-	-	-	-	-	-
2004/11/15,09:39	4.5	37.396	138.957	5	18/10	15/12	22	-	34/26	-	35/18	-	-

\* 最大加速度はNS成分/EW成分の値を示す。ただし、川口町BはEW成分を示す。



図一 余震観測で得られた地震記録の一例 (2004年11月6日22時5分の地震)

A が大きいこと、本震による被害が顕著であった武道窪と木沢地区では川口町役場周辺に比べて卓越周期が長いこと、周辺の建物に被害が少なかった川口小では最大加速度が大きく卓越周期が短いことが分かる。

### § 3. 本震の震源モデルの推定

#### 3.1 推定方法

2004年新潟県中越地震の震源に関する調査は、地震発生直後から多数の研究者によって行われており、断層位置やすべり分布が観測記録に基づいたインバージョン解析により推定されている<sup>例えば 4.5)</sup>。本研究では、経験的グリーン関数法による地震動推定で用いる震源モデルを、既往の調査結果のうち堀川による震源モデル (以下、堀川モデルと記す)<sup>5)</sup>を参考に設定した。具体的には、断層位置、断層の大きさ、すべり量分布、破壊開始点、破壊伝播の時間遅れを堀川モデルの値を参考に定めた。実効応力については、堀川モデルに値

表一 本震の震源パラメータ<sup>5)</sup>

発震時	2004/10/23 17:56
断層位置 (断層原点)	北緯 37.4033° 東経 139.0064°
走向	214 °
傾斜角	56 °
断層長さ	31.0 km
断層幅	20.0 km
断層上端深さ	0.2 km
地震モーメント	$8.17 \times 10^{25}$ dyne·cm
平均すべり量	43.8 cm
平均応力降下量	1.29 MPa
短周期レベル	$1.07 \times 10^{26}$ dyne·cm/s <sup>2</sup>
せん断波速度	3.4 km/s
密度	2.6 t/m <sup>3</sup>
Q値	$76f^{0.74}$

が示されていないため、そのレベルを変えて本震の観測記録が得られている地点の地震動を経験的グリーン

関数法により計算し、その結果が観測記録とあうように値を定めた。なお、堀川モデルを用いたのは、余震記録の詳細な分析により明らかになった余震の震源位置のずれ<sup>6)</sup>が反映され、かつ、震源域にある川口町役場の観測記録を用いて震源モデルが推定されていることによる。堀川モデルの震源パラメータを表-2に示し、断層位置とすべり量分布を図-1に示す。実際の計算では、要素断層の大きさを3km×3kmにして地震動を求めるため、表-2に示す値から断層長さを走向方向に2km、断層幅を傾斜方向に1km延長した。また、堀川モデルでは、1km×1kmの大きさの要素断層ごとにすべり量が推定されているため、3km×3kmの大きさの要素断層のすべり量を、同じ範囲で地震モーメントが等しくなるように定めた。

### 3.2 経験的グリーン関数法で用いる余震

経験的グリーン関数法で用いる余震を、マグニチュードが本震より2程度小さい地震であること、震源メカニズムが本震に近い地震であること、記録が得られていることを条件として、表-3に示す24地震を選択した。ここでは、同一の余震記録を経験的グリーン関数として各要素断層に割り付けることにし、24ケースの地震動を求めた。余震の震源は広域に分布していることや、震源域では地盤構造が複雑であることから、経験的グリーン関数法により計算した地震動は用いる余震記録によってばらつく可能性がある。そのため、震源モデルの実効応力の値は、24ケースの地震動のうち、より多くのケースで観測記録とあうように定めた。用いた余震の震源パラメータを表-3に示し、各地震の震源位置およびメカニズムを図-1に示す。表-3に示すパラメータのうち震源位置は、余震記録の詳細な分析により明らかになった震源位置のずれ<sup>6)</sup>を補正するため、気象庁による公表値から西北西に約4kmずらした地点とした。地震モーメントは防災科学技術研究所のF-netで公表されている値<sup>7)</sup>とした。実効応力 $\sigma$ は臨界振動数 $f_c$ を変えて計算した理論スペクトル<sup>1)</sup>が観測記録とあうように定めた。理論スペクトルは地震基盤と観測点の地盤のインピーダンス比<sup>1)</sup>を考慮して求めた。理論スペクトルと観測記録との対応は、震源周辺にある防災科学技術研究所のKiK-net観測点の地中観測記録を対象に検討した。定めた震源パラメータによる理論スペクトルが観測記録と良く一致している例として、2004年11月11日の地震のNIGH12湯之谷における観測記録を図-3に示す。

### 3.3 実効応力の推定

震源モデルの実効応力のレベルを変えて、経験的グリーン関数法により本震の地震動を計算し、その結果

表-3 余震の震源パラメータ

No.	発震時刻	モーメント マグニ チュード <sup>*</sup> Mw	震源位置			地震 モーメント M <sub>0</sub> [dyne-cm]	臨界 振動数 f <sub>c</sub> [Hz]	実効 応力 $\sigma$ [MPa]
			北緯 [°]	東経 [°]	深さ [Km]			
1	2004/10/23,19:45	5.5	37.308	138.834	8	1.78×10 <sup>24</sup>	0.6	8.2
2	2004/10/24,00:23	3.8	37.235	138.771	5	5.14×10 <sup>21</sup>	3.5	4.7
3	2004/10/24,02:38	3.6	37.260	138.770	8	2.43×10 <sup>21</sup>	4.5	4.7
4	2004/10/24,06:44	3.5	37.331	138.847	5	2.06×10 <sup>21</sup>	4.5	4.0
5	2004/10/24,08:02	3.8	37.272	138.897	8	5.29×10 <sup>21</sup>	3.5	4.9
6	2004/10/24,10:06	4.2	37.319	138.885	5	1.89×10 <sup>22</sup>	2.4	5.6
7	2004/10/24,13:54	3.7	37.224	138.832	5	3.82×10 <sup>21</sup>	4	5.2
8	2004/10/25,06:04	5.6	37.342	138.905	14	2.47×10 <sup>24</sup>	0.6	11.4
9	2004/10/27,10:40	5.8	37.304	138.992	11	6.34×10 <sup>24</sup>	0.4	8.7
10	2004/11/01,18:58	3.8	37.400	138.959	5	4.84×10 <sup>21</sup>	3.5	4.4
11	2004/11/04,08:57	5.1	37.442	138.874	11	5.64×10 <sup>23</sup>	1	12.1
12	2004/11/04,09:39	3.6	37.446	138.879	11	3.20×10 <sup>21</sup>	4	4.4
13	2004/11/05,14:56	4.1	37.189	138.785	8	1.65×10 <sup>22</sup>	2.25	4.0
14	2004/11/06,22:05	4	37.362	138.850	5	1.28×10 <sup>22</sup>	2.7	5.4
15	2004/11/07,03:54	3.7	37.186	138.783	5	3.76×10 <sup>21</sup>	3.5	3.5
16	2004/11/08,11:15	5.5	37.408	138.990	5	2.24×10 <sup>24</sup>	0.6	10.4
17	2004/11/11,18:04	3.5	37.253	138.860	5	1.74×10 <sup>21</sup>	5	4.7
18	2004/11/12,02:24	3.9	37.250	138.889	8	8.21×10 <sup>21</sup>	3.2	5.8
19	2004/11/15,09:39	4.5	37.396	138.957	5	5.37×10 <sup>22</sup>	1.5	3.9
20	2004/12/25,10:23	4.1	37.418	138.919	8	1.88×10 <sup>22</sup>	2.4	5.6
21	2004/12/28,18:30	4.7	37.334	138.941	5	1.22×10 <sup>23</sup>	1.2	4.5
22	2005/01/20,01:11	3.4	37.391	138.916	17	1.50×10 <sup>21</sup>	5.5	5.3
23	2005/06/20,13:03	4.9	37.244	138.546	5	2.16×10 <sup>23</sup>	1	4.6
24	2005/08/21,11:29	4.6	37.313	138.667	8	1.06×10 <sup>23</sup>	1.6	9.3

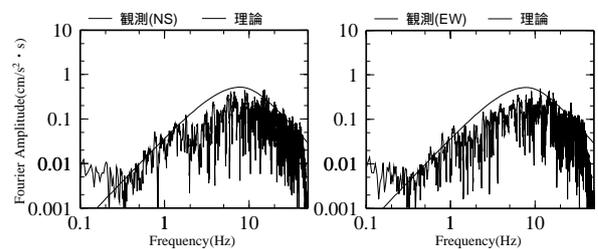
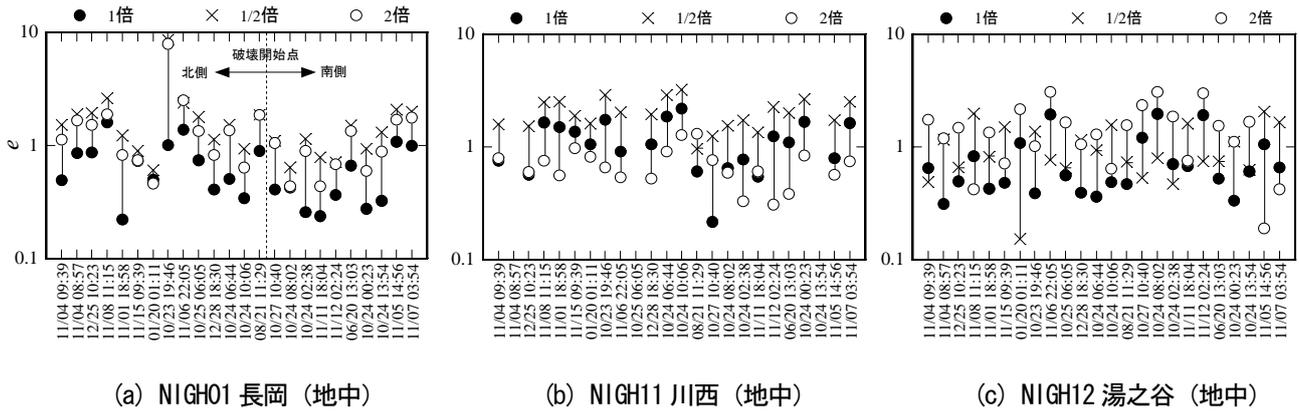


図-3 余震観測記録のフーリエ振幅スペクトルと理論スペクトルとの対応の一例 (No.17 地震のNIGH12 (湯之谷) の地中(V<sub>s</sub>=780m/s)における観測記録)

が観測記録とあうように実効応力の値を定めた。ここでは、実効応力と応力降下量が等しいと仮定して、応力降下量とすべり量が比例関係で表されることから<sup>8)</sup>、各要素断層の実効応力をすべり量に比例するように表した。各要素断層の実効応力の値は、断層全体の加速度震源スペクトルの短周期レベル<sup>9)</sup>が、壇らによる経験式<sup>9)</sup>から地震モーメントに対して定まる内陸地震の平均的な値の1/2倍、1倍および2倍になるように定めた。本震の地震動の計算地点は、防災科学技術研究所のKiK-netの地中観測点のうち、本震の断層に近いNIGH01 (長岡)、NIGH11 (川西)、NIGH12 (湯之谷)



(備考) 各図の凡例は震源モデルの短周期レベルの大きさを内陸地震の平均的な値に対する割合で表している

図-4 断層周辺の KiK-net 観測点における本震の観測記録と合成波形との差 e の短周期レベルによる比較

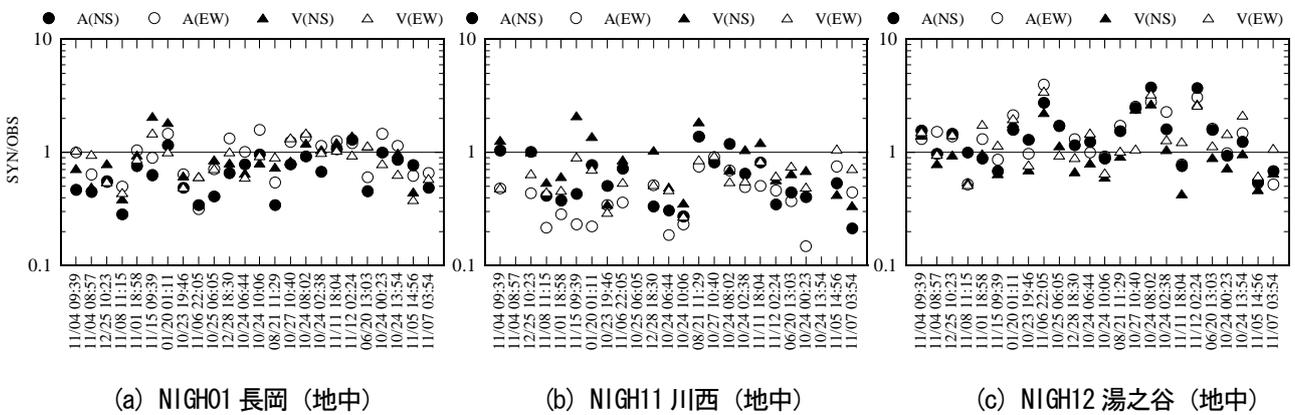


図-5 短周期レベルを内陸地震の平均的な値にしたときの合成波形(SYN)と本震の観測記録(OBS)の最大加速度 A および最大速度 V の比

の 3 地点とした。また、地震動の計算では、経験的グリーン関数法のうち壇・佐藤の方法<sup>9)</sup>を用いた。経験的グリーン関数として用いた余震記録は主要動を含む 40 秒間を切り出し、周波数領域において 0.2~0.25Hz の cos 型ハイパスフィルタにより長周期ノイズを取り除いて用いた。伝播経路の減衰を表す Q 値は、岩田らにより調査された結果<sup>10)</sup>を用いた。計算した地震動(以下、合成波形と記す)と観測記録との対応の優劣は、水平 2 成分の最大加速度 A と最大速度 V の対数について観測記録と合成波形の差の総和を求め、その大小から判断した。具体的には、次式で表す指標 e で比較し、指標 e が小さいほど対応が良いと判断した。

$$e = \sum_{i=1}^2 \left\{ \left| \log \left( A_{syn_i} / A_{obs_i} \right) \right| + \left| \log \left( V_{syn_i} / V_{obs_i} \right) \right| \right\} \quad (1)$$

ここに、syn および obs は合成波形および観測記録を表し、i=1 は NS 成分、i=2 は EW 成分を示す。

経験的グリーン関数法の計算で用いた余震ごとの指標 e を、計算地点別に短周期レベルで比較して図-4 に示す。指標 e が小さくなるのは、NIGH01 と NIGH12 では短周期レベルが内陸地震の平均的な値のときであ

るが、NIGH11 では短周期レベルが内陸地震の平均的な値の 2 倍のときであるケースが少なくない。指標 e が小さくなるときの短周期レベルが観測点や用いた余震記録によって異なるのは、前述した震源域の地盤構造の複雑さの影響のほか、地震動の計算地点と余震の震源が近いことから、余震の震源位置の精度も影響していると考えられる。3 地点で総合的にみると、指標 e が小さくなるのは、短周期レベルを内陸地震の平均的な値にしたときであると考えられる。用いた余震で指標 e を比べると、NIGH01 では観測点に近い断層北側の余震に比べて、本震の破壊開始点より南側に震源がある余震の方が指標 e が小さい傾向があるが、震源位置による指標 e の差は大きくないと言える。

### 3.4 合成波形と観測記録との対応

震源モデルの短周期レベルを内陸地震の平均的な値にしたときの合成波形の最大加速度および最大速度を、成分別に観測記録に対する比で表して図-5 に示す。NIGH01 と NIGH12 ではその比が 1 を中心にして 0.5~2 の範囲にばらついているが、指標 e が他の 2 地点に比

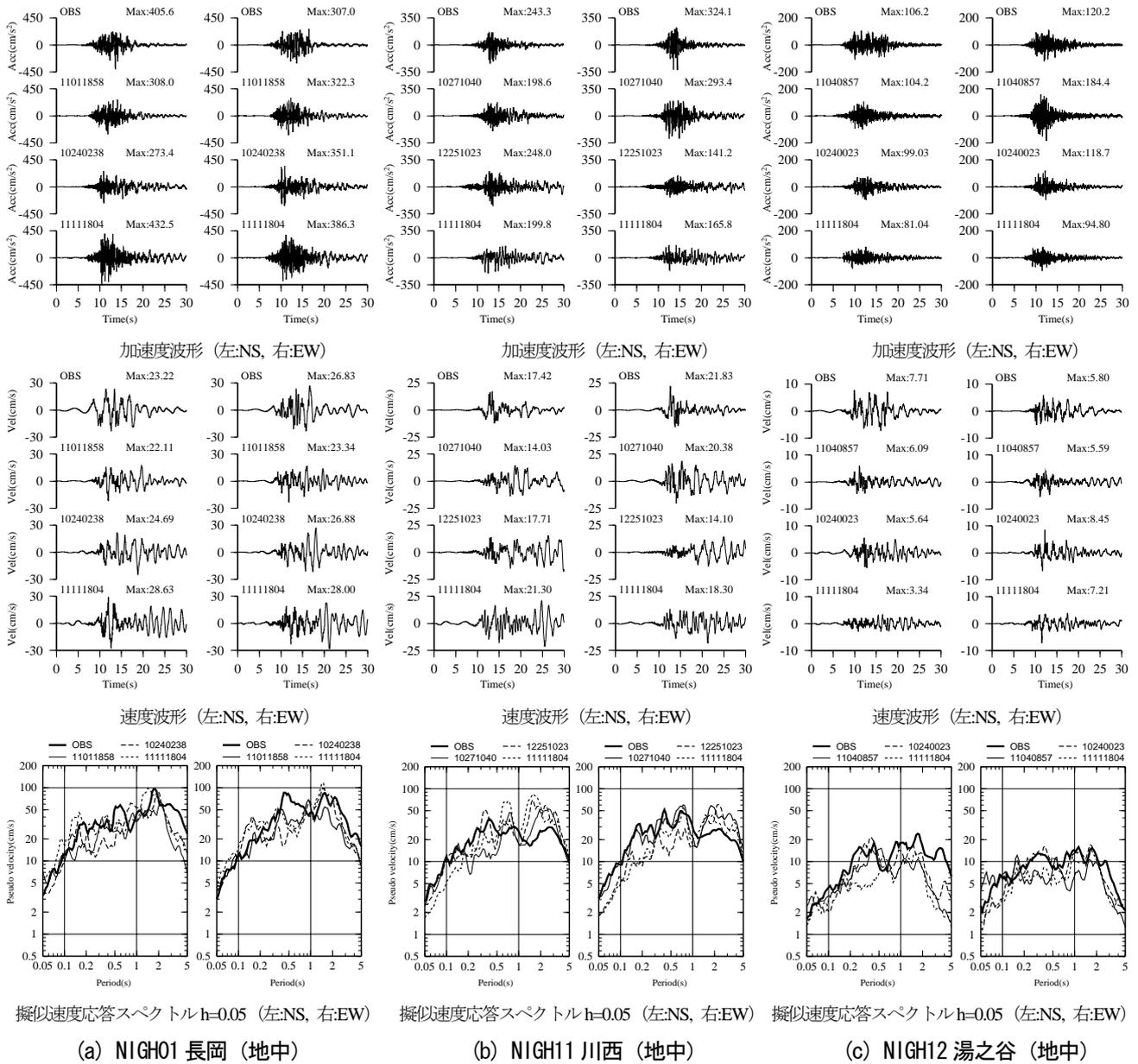


図-6 断層周辺の KiK-net 観測点における本震の観測記録と合成波形との比較

べて大きい NIGH11 では、合成波形の最大値が観測記録より小さめになっている。最大値以外の合成波形と観測記録の対応を見るために、地点別に図-4 から 24 地震の中で指標  $e$  が小さい 2 地震を選択し、その観測記録を用いて計算した地震動の加速度波形、積分速度波形および減衰定数 5% 擬似速度応答スペクトルを図-6 に示す。同図には指標  $e$  の 3 地点の平均が最小であった 2004 年 11 月 11 日 18 時 4 分の地震の観測記録を用いて計算した合成波形も示している。用いた余震記録によって合成波形に差はあるが、経時特性やスペクトルの形状は観測記録と概ね対応しているといえる。また、震源周辺の K-NET および KiK-net (地中) の 11 観測点で計算した合成波形の最大加速度および最大速

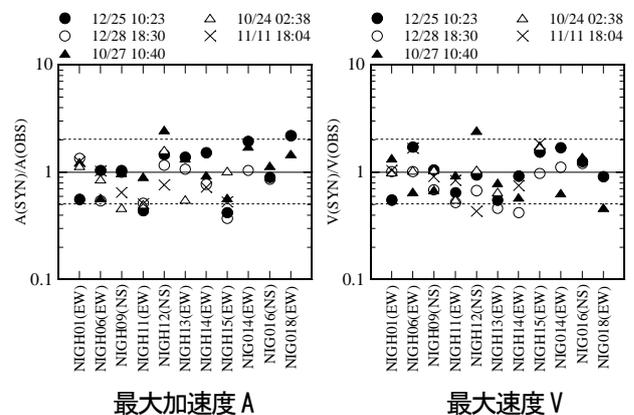


図-7 断層周辺の既存観測点における合成波形 (SYN) と観測記録 (OBS) の最大値の比

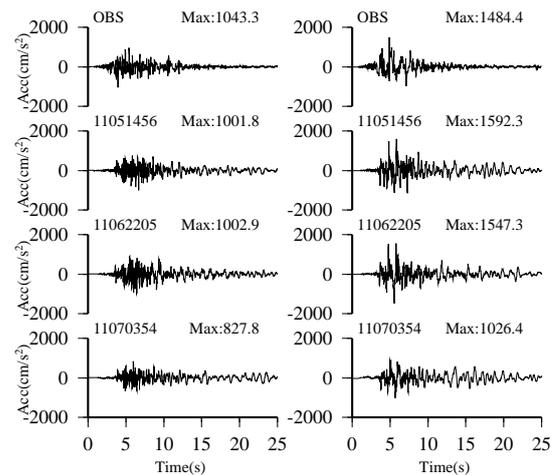
度を、観測記録に対する比で表して、図-7に示す。図は、3地点で指標eが小さかった5地震の観測記録を用いて計算した合成波形で、水平2成分のうち観測記録の最大速度が大きい方の成分を示している。合成波形の最大値は、ほとんどが観測記録の0.5~2倍の範囲に収まっており、短周期レベルを内陸地震の平均的な値にした震源モデルによって、震源周辺の多くの観測点で本震時の地震動が再現できると考えられる。

#### § 4. 震源域の地震動推定

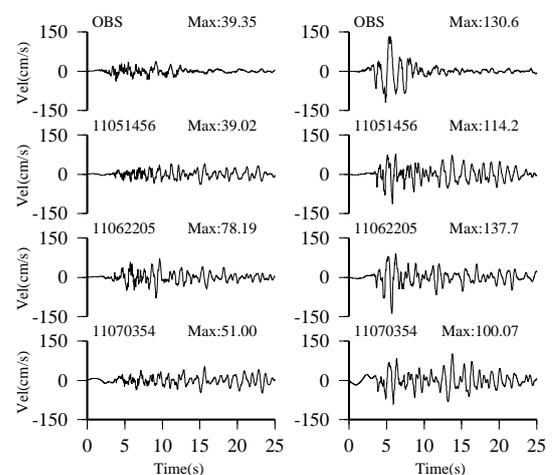
##### 4.1 余震観測点における地震動推定

短周期レベルを内陸地震の平均的な値とした震源モデルを用いて、余震観測点における本震時の地震動を推定した。地震動の計算では、表-3に示す地震のうち、余震観測で記録が得られた11月5日、11月6日、11月7日の3地震の観測記録を経験的グリーン関数として用いた。本震の観測記録が得られている川口町役場の合成波形を図-8に示す。NS成分では最大速度と応答スペクトルの周期1秒付近の振幅が観測記録より大きい。加速度波形の経時特性や、最大速度が大きいEW成分の速度波形の経時特性およびスペクトルの卓越周期は観測記録と良く対応している。このことから、震源域においても、設定した震源モデルによって本震時の地震動が概ね再現できると考えられる。なお、合成波形の後続動部分には長周期成分が卓越しており、この傾向は11月5日と11月7日の余震記録を用いたときに顕著である。これは、用いた余震の震源が計算地点から遠く、観測記録に表面波が比較的多く含まれていたためと考えられる。

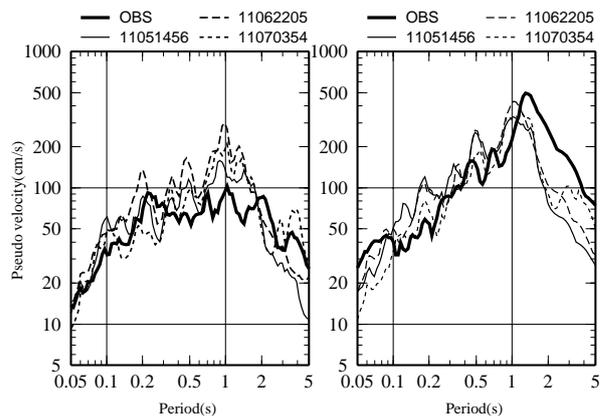
次に、川口町の7地点と塩殿小における合成波形を図-9に示す。図は11月6日の地震の観測記録を用いて計算した合成波形の水平2成分のうち、最大速度が大きい成分を示している。川口町役場の周辺では、最大速度は川口町Aが最も大きく、川口町Bと川口小は川口町役場と大きな差はない。応答スペクトルは、レベルの差はあるが、いずれの地点も周期0.2秒付近と1秒付近にピークがある。これらの地点のうち、周辺で大きな被害を受けた建物があった川口町役場と川口町Bでは、建物の構造被害への影響が大きいと考えられている周期1秒<sup>1)</sup>付近の振幅が他に比べて大きい。川口町Aでは、周辺に建物がほとんどなかったため被害との対応は不明であるが、最大速度が大きく、応答スペクトルも周期0.2~1秒で200cm/s程度と大きいことから、建物に被害を生じさせるのに十分な大きさの地震動であったと考えられる。木造家屋の被害が顕著であった武道窪では、最大速度や応答スペクトルの周期1



(a) 加速度波形 (左:NS, 右:EW)



(b) 速度波形 (左:NS, 右:EW)

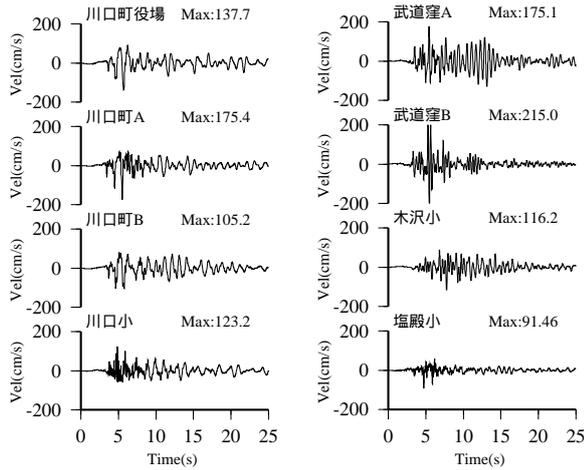


(c) 擬似速度応答スペクトルh=0.05 (左:NS, 右:EW)

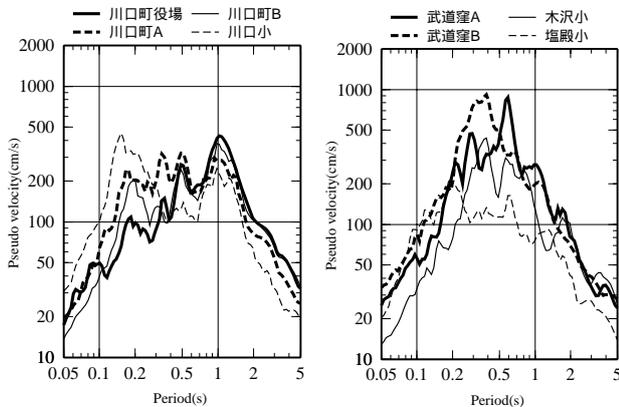
(備考) OBSは観測記録、数字は経験的グリーン関数法による合成波形の計算で用いた余震を表す

図-8 川口町役場における観測記録と合成波形との比較

秒以下の振幅が川口町役場より大きい。応答スペクトルの周期1秒付近に明瞭なピークはないが、最大応答速度は大きく200cm/sを超えている。周辺で地盤変状や一部の建物に大きな被害が生じた木沢小では、最大



(a) 速度波形



(b) 擬似速度応答スペクトル (h=0.05)

(注) 武道窪A,Bと川口小はNS成分, それ以外はEW成分

図-9 余震観測点における合成波形 (11月6日22時5分の地震を要素地震とした場合)

速度は川口町役場と同じレベルであり、応答スペクトルの周期0.5秒以下の成分は川口町役場より大きい。また、基盤が浅く表層地盤による増幅の影響が小さいと考えられる塩殿では、最大速度と応答スペクトルともに川口町役場より小さい。

主な余震観測点における合成波形の最大速度を図-10に示す。図は3地震の余震記録を用いて計算した合成波形の水平2成分の最大速度のうち、大きい方の値を示している。同じ地点でも用いた余震記録によって最大値がばらついているが、地点間の相対的な関係を見ると、川口町A、武道窪、田麦山では川口町役場より最大速度が大きく、川口小と木沢小では同じレベル、その他の地点では小さい。最大速度が川口町役場と同レベルまたは大きくなっているのは、図-1から、破壊開始点から観測点までの間にすべりの大きい領域がある地域であることが分かる。実際の被害<sup>12,13</sup>との対応については、最大速度が川口町役場より小さい地点では、周辺に大きな被害を受けた建物は確認できなかった。また、最大速度が川口町役場と同じレベルか大

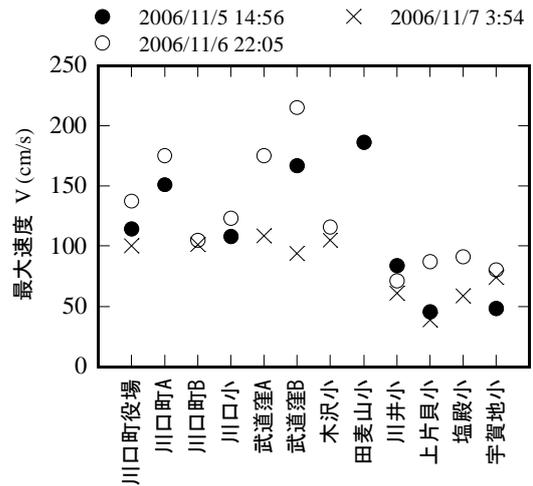


図-10 余震観測点における合成波形の最大速度

表-4 川口町役場における地盤調査結果<sup>14)</sup>

深度(m)	土質*	Vs(m/s)	密度(t/m <sup>3</sup> )
0.9	1	130	1.7
1.6	1	130	1.9
1.9	2	130	2.0
3.3	3	130	2.0
5.2	3	210	2.0
6.9	1	310	2.0
7.2	2	310	2.0
9.2	1	310	2.0
10.2	2	310	2.0
17.1	1	310	2.0
19.5	2	520	2.0
21.0	1	520	2.0
22.0	2	420	2.0
25.0	1	420	2.0
	1	560	2.0

\* 1: 粘性土 2: 砂質土 3: 礫質土

きい地区のほとんどで、大きな被害が生じた建物が確認されていることから、推定地震動の大きさと建物被害の有無とは概ね対応しているといえる。

#### 4.2 川口町役場の地震動特性に関する考察

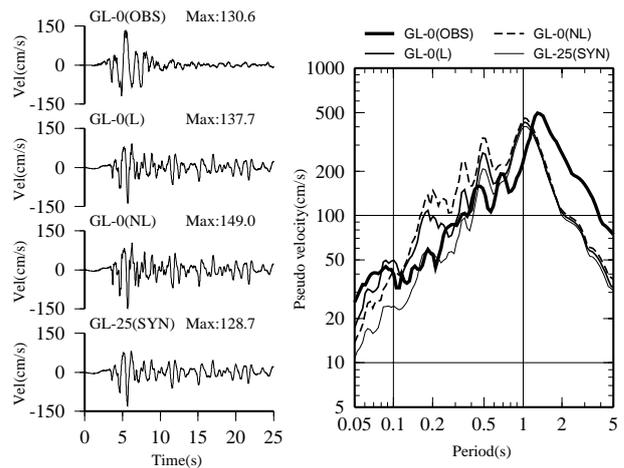
川口町役場において大加速度で周期1秒付近が卓越した地震動が発生した要因を調べるために、表層地盤による増幅の影響について検討した。まず、表-4に示す地盤調査結果<sup>14)</sup>に基づいて川口町役場の地盤をモデル化し、地表の余震観測記録から地盤の線形解析によりGL-25m (Vs=560m/sの層)の地点の地震動を計算した。その結果を経験的グリーン関数として地中の合成波形を計算した。次に、地中の合成波形から地盤の等価線形解析および線形解析により地表の地震動を計算した。等価線形解析では、今津・福武によって提案されている地盤の動的線形特性<sup>15)</sup>を用いた。11月6日の余震記録を用いて計算した地中の合成波形と、地中の合成波形から地盤応答解析により求めた地表地震

動を、地表の観測記録と比較して図-11に示す。地中の合成波形から、川口町では地中 ( $V_s=560\text{m/s}$ ) においても最大速度が  $100\text{cm/s}$  を超える大きな地震動であったことが分かる。また、地表と地中の地震動を比較すると、応答スペクトルの周期  $0.2\sim 0.5$  秒の振幅が増幅しているが、周期  $1$  秒付近では大きな差はない。また、地表地震動を線形解析と等価線形解析で比べても、周期  $1$  秒付近で大きな差はない。したがって、川口町役場で周期  $1$  秒付近の成分が卓越した要因として、表層地盤の増幅や非線形化の影響は小さいことが分かる。既報<sup>16)</sup>では、同じ震源モデルで破壊形式を堀川モデルの破壊伝播の時間遅れを考慮したものではなく、破壊開始点から同心円状に進行する条件に変えて川口町役場の地表地震動を計算しており、その結果では周期  $1$  秒付近のピークが本報告で示す結果ほど顕著に表れていない。このことから、川口町役場の地震動特性は、破壊伝播の特性が大きく影響しているといえる。

地中の合成波形と地盤応答解析から求めた地表地震動の最大加速度および最大速度を、最大速度が大きいEW成分について、図-12に示す。最大加速度は表層地盤で  $1.5\sim 2.0$  倍増幅しているのに対して、最大速度の増幅は小さい。川口町役場では、GL-5.2m以深のせん断波速度  $V_s$  が  $300\text{m/s}$  以上であり、表層近くまで比較的固い地盤である。また、GL-5.2m以浅でも、せん断波速度  $V_s$  は  $100\text{cm/s}$  以上であり、表層  $3\text{m}$  以浅で最大速度の増幅が大きかったK-NET小千谷<sup>17)</sup>ほど小さくない。このことから、最大速度に比べて最大加速度が大きく増幅したのは、川口町役場では、顕著な非線形化が生じ難く、短周期成分が増幅されやすい地盤であったためと考えられる。

## § 5. おわりに

2004年10月23日に発生した新潟県中越地震の震源域における地震動を、地震直後に実施した余震観測で得られた記録に基づいて推定し、以下のことを示した。1) 震源域で震度7を記録した川口町役場の観測記録は、短周期レベルが内陸地震の平均的な値となるように定めた震源モデルにより概ね再現できる。2) 震源域で建物に大きな被害が生じた地区では、地震動の最大速度が川口町役場より大きいか同じレベルであった。3) 川口町役場の観測記録に見られる周期  $1$  秒付近のピークは、表層地盤の増幅や非線形化による影響は小さく、震源の破壊伝播特性が大きく影響している可能性がある。

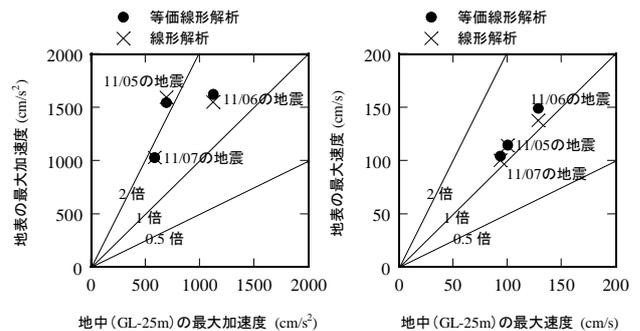


(a) 速度波形

(b) 擬似速度応答スペクトル

(備考) OBSは観測記録、GL-25(SYN)は地中における合成波形  
GL-0(L)は地盤の線形解析による地表地震動  
GL-0(NL)は地盤の等価線形解析による地表地震動

図-11 川口町役場における地中の合成波形と地盤応答解析による地表地震動との比較



(a) 最大加速度

(b) 最大速度

図-12 川口町役場における地表および地中の合成波形の最大値 (EW成分)

## 謝辞

被災され種々対応に追われている中、快く余震観測の場を提供していただいた各市町村の教育委員会、各学校の教職員の方々、施設の所有者・管理者の方々に厚く御礼申し上げます。観測には東京大学地震研究所の工藤一嘉助教授、消防研究所の畑山健氏、東京大学の坂上実氏、東京大学大学院生の金嶺坤氏、田中康久氏、村瀬正樹氏の協力を得ました。防災科学技術研究所のK-NET・KiK-net観測点の観測記録とF-netの震源情報および自治体震度計の川口町の観測記録を使用させていただきました。産業総合技術研究所の堀川氏には断層モデルのデータを提供していただきました。記して感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 壇一男, 佐藤俊明: “断層の非一様滑り破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測”, 日本建築学会構造系論文集, No.509, pp.49~60, 1998.
- 2) 工藤一嘉, 松島信一, 畑山研, 福喜多輝, 早川崇, 神原浩, 坂上実: “2004年新潟県中越地震の震源域における余震・微動観測とその記録を用いた分析(その1)余震・微動観測の概要”, 地球惑星科学関連学会2005年合同大会予稿集, S079-002, 2005.
- 3) 工藤一嘉, 高橋正義, 坂上実, 神野達夫, 鹿熊英昭, 坪井大輔: “機動強震観測のための過減衰・動コイル型加速度計の開発と性能試験, 機動強震アレイ観測のための軽小型強震計の製作と観測・解析マニュアルの作成”, 平成7年度~平成9年度科学研究費補助金[基盤研究(A)]研究成果報告書(07558056), pp.1~24, 1998.
- 4) 本多亮, 青井真, 関口春子, 森川信之, 功刀卓, 藤原 広行: “K-NET 及び KiK-net の近地強震記録から得られた2004年新潟県中越地震の震源過程”, 地球惑星科学関連学会2005年合同大会予稿集, S079-005, 2005.
- 5) 堀川晴央: “再決定震源と強震記録による2004年中越地震の断層モデル”, 地球惑星科学関連学会2005年合同大会予稿集, S079-P004, 2005.
- 6) Sakai S., N. Hirata, A. Kato, E. Kurashimo, T. Iwasaki, and T. Kanazawa: “Multi-fault system of the 2004 Mid-Niigata Prefecture Earthquake and its aftershocks”, Earth Planets Space, 57, pp.417-422, 2005.
- 7) 防災科学技術研究所広帯域地震観測網データ(<http://www.fnct.bosai.go.jp/freesia/>).
- 8) Eshelby, J.: “The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems”, Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol.241, pp.376-396, 1957.
- 9) 壇一男, 渡辺基史, 佐藤俊明, 石井透: “断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化”, 日本建築学会構造系論文集, No.545, pp.51~62, 2001.
- 10) 岩田知孝, 森勇人, 川瀬博: “スペクトルインバージョンによる強震観測点サイトの非線形性の抽出”, 平成16年(2004年)新潟県中越地震に関する緊急調査研究報告書, 2005.
- 11) 境有紀, 額綱一起, 神野達夫: “建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案”, 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.85~92, 2002.
- 12) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所: “平成16年新潟県中越地震建築物被害調査報告(速報)”, 2005.
- 13) 萩原由訓, 大井昌弘, 野畑有秀, 田内建次, 先名重樹, 森川信之, 藤原広行: “新潟県中越地震における地震被害の検討(その2)建物の被害率関係に関する検討”, 日本建築学会大会講演梗概集, B-2分冊, pp.149~150, 2005.
- 14) 先名重樹, 森川信之, 大井昌弘, 安達繁樹, 藤原広行: “小千谷・川口地区における微動探査結果と浅部地盤構造モデルについて”, 地球惑星科学関連学会2005年合同大会, S101-P020, 2005.
- 15) 今津雅紀, 福武毅芳: “砂礫材料の動的変形特性”, 第21回土質工学会研究発表会, pp.509~512, 1986.
- 16) 松島信一, 神原浩, 工藤一嘉: “強震余震観測による強震動評価”, 月刊地球, 号外 No.53, pp.165~171, 2006.
- 17) 藤川智, 先名重樹, 藤原広行, 大井昌弘: “2004年新潟県中越地震における小千谷市内の表層地盤応答の再現”, 日本地震工学会大会梗概集 pp.424~425, 2005.