



## サイト特性置換手法に基づく2011年長野・新潟県境地震 における栄村横倉集落での地震動の評価

秦吉弥<sup>1)</sup>、村田晶<sup>2)</sup>、野津厚<sup>3)</sup>、宮島昌克<sup>4)</sup>

1) 正会員 日本工営(株)中央研究所、主任研究員 博(工)  
e-mail : hata-ys@n-koei.jp

2) 正会員 金沢大学理工研究域、助教 博(工)  
e-mail : murata@t.kanazawa-u.ac.jp

3) 正会員 (独)港湾空港技術研究所地震動研究チーム、チームリーダー 博(工)  
e-mail : nozu@pari.go.jp

4) 正会員 金沢大学理工研究域、教授 工博  
e-mail : miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

### 要 約

2011年東北地方太平洋沖地震の翌日に発生した2011年長野・新潟県境地震では、震源域を中心に強い地震動が数多く観測された。震源近傍の長野県栄村などでは、住家被害などが多発しており、被災地点の地震動を推定することは非常に重要である。そこで本研究では、栄村横倉集落での余震観測結果などに基づいて、当該地点におけるサイト特性を評価した。そして、サイト特性置換手法を用いて、栄村横倉集落での地震動を推定した。さらに、既往の大規模地震による強震観測記録との比較検討を行い、栄村横倉集落における推定地震動の特徴についても言及した。

キーワード： 地震動、余震観測、サイト特性、2011年長野・新潟県境地震

### 1. はじめに

2011年3月12日3時59分に、長野県北部の新潟県との県境付近の深さ8kmで、マグニチュード6.7の内陸地殻内地震が発生し、栄村北信(栄村役場)では震度6強を記録した。本稿では、この地震を2011年長野・新潟県境地震<sup>1)</sup>と称することにする。この地震により、住家などの建物被害や地すべりなどの地盤災害などが長野県栄村を中心に多発している<sup>2)</sup>。その中でも、栄村の横倉および青倉集落では、住家被害が集中的に発生しており<sup>3),4),5)</sup>、当該地点における本震時の地震動を推定することは非常に重要である。

本稿では、2011年長野・新潟県境地震における住家被害地点での地震波形の推定を行い、被災機構の解明に資することを目的とし、サイト特性置換手法<sup>6)</sup>を用いて栄村横倉集落での地震動を推定した。具体的には、まず、横倉集落の地震動に寄与したと考えられる断層面上の部分抽出するため、経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンにより、断層面上のすべり分布を推定した。次に、横倉集落で余震観測を行い、その結果などに基づいて、横倉集落でのサイト特性を評価した。さらに、サイト特性置換手法を用いて横倉集落周辺の既存強震観測点における記録の再現解析を行い、その適用性を確認し

た。最後に、サイト特性置換手法を用いて本震時の横倉集落での地震動を推定し、その推定地震動と既往の大規模地震における強震観測記録との比較検討を行った。

なお、本研究における地震動推定では、住家などの建物被害率との相関が比較的高い周波数帯域<sup>7)</sup>などを踏まえ、やや短周期帯域として0.2~2.0Hzの周波数帯域を定義し、大きな地震被害に結びつきやすいと考えられるこの周波数帯域の速度波形に主に着目することとした。

## 2. 断層面上におけるすべり分布の推定

ここでは、横倉集落の地震動に寄与したと考えられる断層面上の部分抽出するため、経験的グリーン関数を用いた波形インバージョン<sup>8),9)</sup>により、2011年長野・新潟県境地震の断層面上におけるすべり分布を推定した。

まず、本震直後24時間の余震分布を見ると、**図1**のように、南西側の余震が浅く、北東側の余震が深い傾向にある。この図から、震源断層は北東側に傾斜する断層であると考えられる。**図2**は、N29°E-S29°W方向の鉛直面に対して、本震直後24時間の余震分布を投影したものであるが（横軸の0は本震の震源）、北東側に傾斜する面上に余震が分布していることが明瞭に読み取れる。傾斜角は、ほぼ45°である（**図2**の実線）。過去に周辺地域で発生した2004年新潟県中越地震<sup>10)</sup>や2007年新潟県中越沖地震<sup>11)</sup>と比較しても、本地震の余震分布から読みとれる断層面は明瞭であると考えられる。このように余震分布から読みとれる断層面が明瞭な場合、余震分布と整合的な断層面を波形インバージョンに用いることが既往の解析では一般的である<sup>12),13)</sup>。しかしながら、F-net<sup>14)</sup>および気象庁<sup>15)</sup>のCMT解は、余震分布と異なり、北西側または南東側に傾斜する逆断層を示唆している。そこで、以下においては、まず、余震分布と整合的な断層面を用いることの妥当性について検討を行った。

**表1**は、震源周辺のK-NET観測点および自治体観測点におけるP波初動の押し引き分布を読みとった結果であり、これを地図上にプロットしたものが**図3**の△である。一方、**図3**のコンターは、気象庁による本震の震源位置に点震源を置いてP波の理論上のラディエーション係数を計算した結果であり（+はP波初動が押しであることを、-はP波初動が引きであることを意味する）、左の図では余震分布と整合的な走向299°、傾斜45°、すべり角-120°を仮定し、右の図ではCMT解<sup>14)</sup>に基づき走向242°、傾斜38°、すべり角117°を仮定した。左の図から、余震分布と整合的な面を仮定した場合でも、正断層に対応するすべり角-120°を仮定すれば、震源周辺のP波初動の押し引き分布をほぼ再現できることがわかる。また、いずれのメカニズムの場合にも、P波の理論上のラディエーション係数は、北東側と南西側で正、北西側と南東側で負となる傾向があり、遠方でのP波の押し引きからは、これら二つのメカニズムが区別しにくいことがわかる。理論上のP波初動に最も顕著な違いが現れるのは震源直上であり、正断層の場合には負、逆断層の場合には正となる。このことは正断層および逆断層に対応する断層運動を考慮すれば直感的にも明らかである。今回の地震では、震源直上の二つの観測点（栄村役場およびK-NET津南）でいずれもP波初動が負となっており、このことが、本地震が正断層の地震であることを強く示唆している。

表1 P波初動の押し引き分布

観測点	観測点名	東経	北緯	押し引き
NGN001	飯山	36.8514	138.3660	+
NGN003	山ノ内	36.7403	138.4129	+
NIG019	小千谷	37.3043	138.8121	+
NIG021	十日町	37.1281	138.7468	+
NIG022	塩沢	37.0364	138.8462	-
NIG023	津南	37.0147	138.6529	-
NIG024	安塚	37.1268	138.4440	-
NIG025	直江津	37.1607	138.2235	-
NIG026	新井	37.0228	138.2507	-
NGN.6021	栄村役場	36.9880	138.5770	-

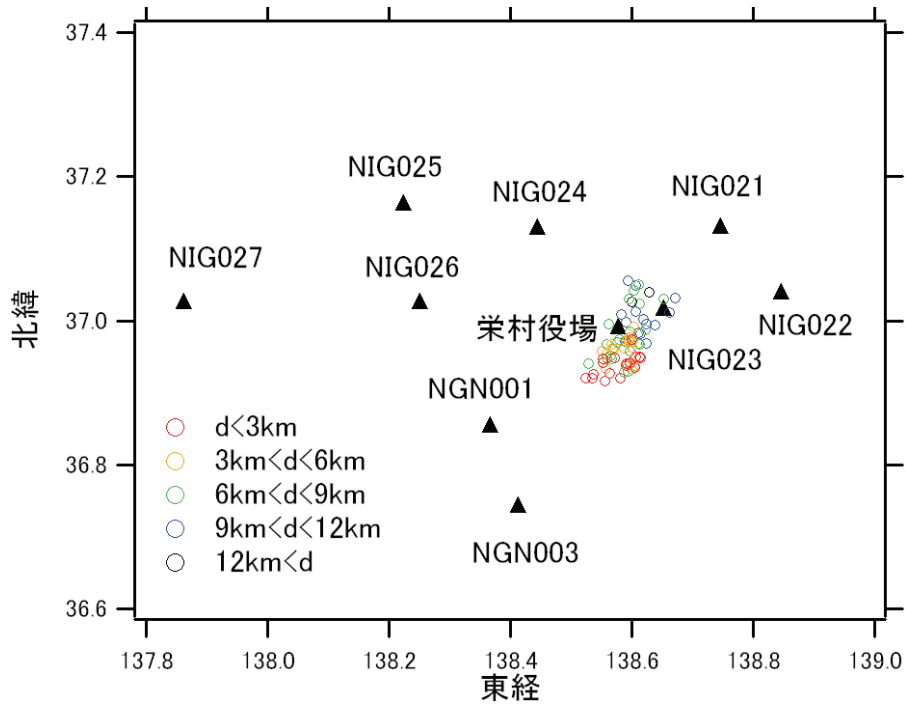


図1 本震直後24時間の余震の震央分布

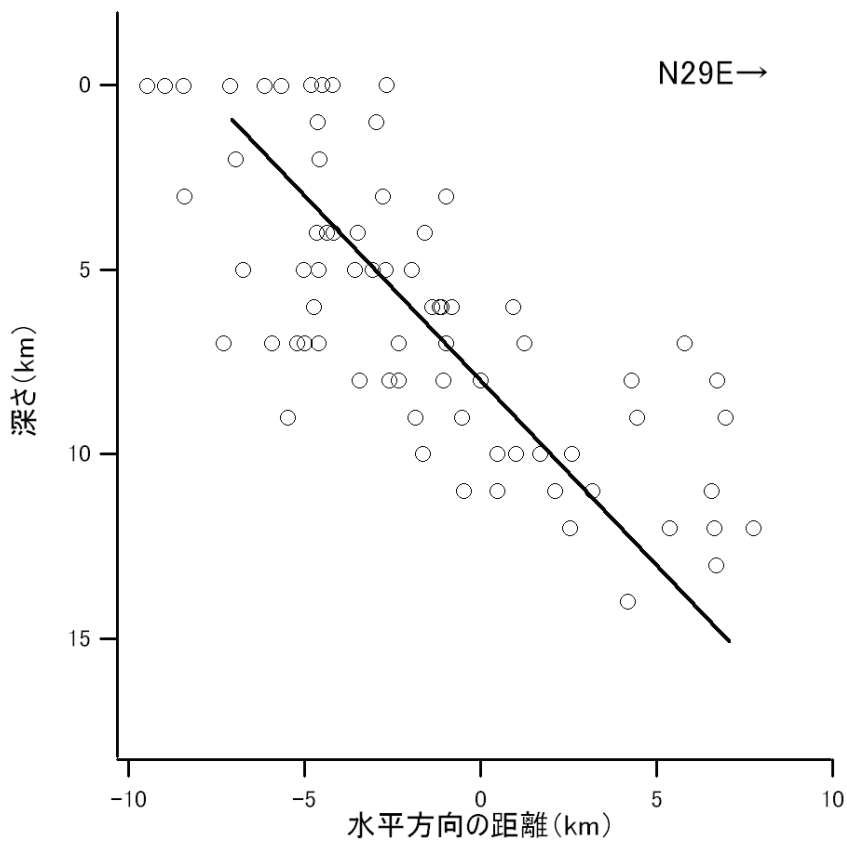


図2 本震直後24時間の余震分布の断面

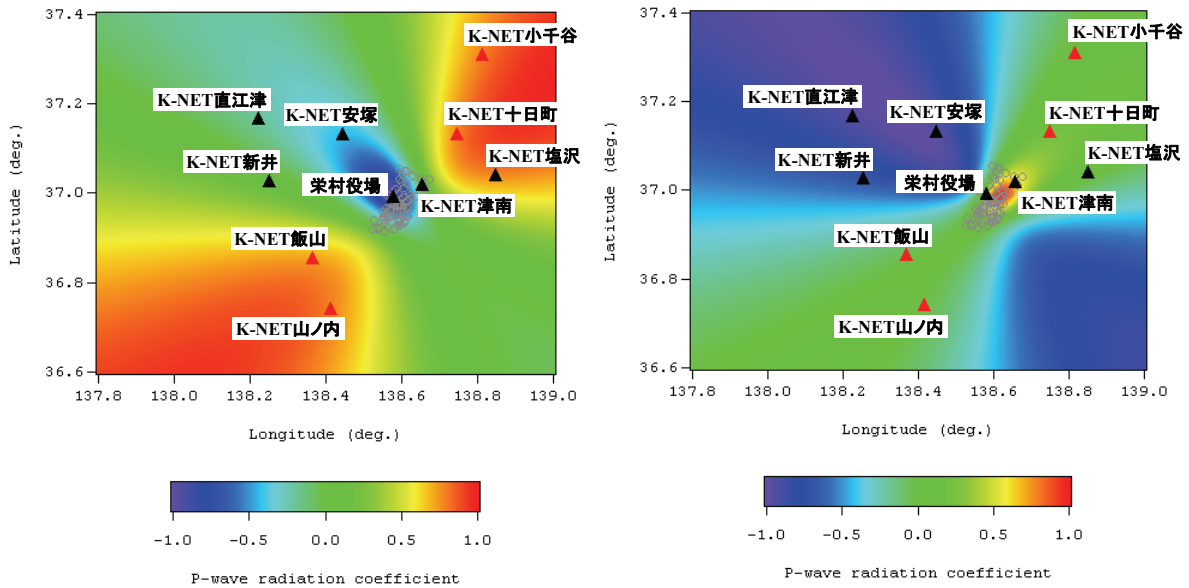


図3 本震時のP波の押し引き分布 (▲・▲) とP波の理論的なラディエーション係数との比較。ここに、▲はP波の初動が押しであることを、▲は引きであることを意味する。左の図では余震分布と整合的な走向299°、傾斜45°、すべり角-120°を仮定した。一方で、右の図では既往のCMT解<sup>14)</sup>に基づく走向242°、傾斜38°、すべり角117°を仮定した。

さらに、図4は、余震分布と整合的な走向299°、傾斜45°、すべり角-120°を仮定した場合と、既往のCMT解<sup>14)</sup>に基づく走向242°、傾斜38°、すべり角117°を仮定した場合の射出角90°の方向（すなわち水平方向）へのSH波とSV波の理論上のラディエーション係数を計算したものである。これを見ると、SH波のラディエーション係数は二つのメカニズムに対してほぼ同一であり、遠方でのSH波もしくはラブ波から両者を区別することは困難であると考えられる。またSV波のラディエーション係数も、極性および振幅という点で両者がかなり似通っており、観測点配置によっては、遠方でのSV波またはレイリー波からこれらを区別することは困難である可能性がある。

以上のことを考慮し、本研究では、余震分布と整合的な北東傾斜の断層面を仮定して波形インバージョンを行うこととした。

経験的グリーン関数を利用した既往の波形インバージョン<sup>8),9)</sup>では、断層面を複数の領域に分割し、それぞれの領域に対して異なる経験的グリーン関数（すなわち中小地震記録）を割り当てることにより、良好な結果を得ている。これは、複数の経験的グリーン関数を用いることにより、断層面から観測点までの伝播経路特性をより精度良く考慮できるためである。そこで、本研究でもこの考え方を適用し、断層面の南西側半分には3月12日7時18分に発生した余震（Mj3.9）（余震1とする）を、断層面の北東側半分には6月2日11時33分に発生した余震（Mj4.7）（余震2とする）を、それぞれ割り当てた。余震記録の選定においては、既往の研究<sup>8),9)</sup>と同様、フーリエ位相特性を考慮した。余震の震央を図5（左）に示す。

インバージョンに用いたデータは震源周辺のK-NETの9地点における0.2~1.0Hzの帯域の速度波形であり、S波を含む10秒間をインバージョンに使用した。断層面は、気象庁の震源（北緯36.985°、東経138.596°、深さ8km）を含むように設定し、長さおよび幅は余震分布と対応するように10kmおよび20kmとした。図5（左）に仮定した断層面の地表面への投影を示す。インバージョンはマルチタイムウインドウ法<sup>16)</sup>に基づいている。10km×20kmの断層を10×20の小断層に分割し、それぞれの小断層でのモーメントレート関数は、余震のモーメントレート関数とインパルス列との合積で表されると仮定した。インパルス列は0.5秒間隔の6つのインパルスからなるものとし、このインパルスの高さをインバージョンの未知数とした。破壊フロントは気象庁の震源から同心円状に速度1.4km/sで広がるものとした。基盤のS波速度は3.5km/sとした。インバージョンには非負の最小自乗解を求めるためのサブルーチン<sup>17)</sup>を用いた。また、すべりの時空間分布を滑らかにするための拘束条件を設けた。観測波と合成波を比較する際には記録のヘッダに記載さ

れた絶対時刻の情報を用いている。図5(右)にインバージョンの結果として得られた最終すべり量の分布(最大値が1となるように基準化したもの)を示している。同図に示すように、領域a, b, cの三箇所最終すべり量が大きな値を示している。なお、このときすべり量を基準化しているのは、余震の地震モーメントが明確でないためである。図6に観測波と合成波の比較を示す。合成波と観測波の一致は一部の観測点を除き良好である。

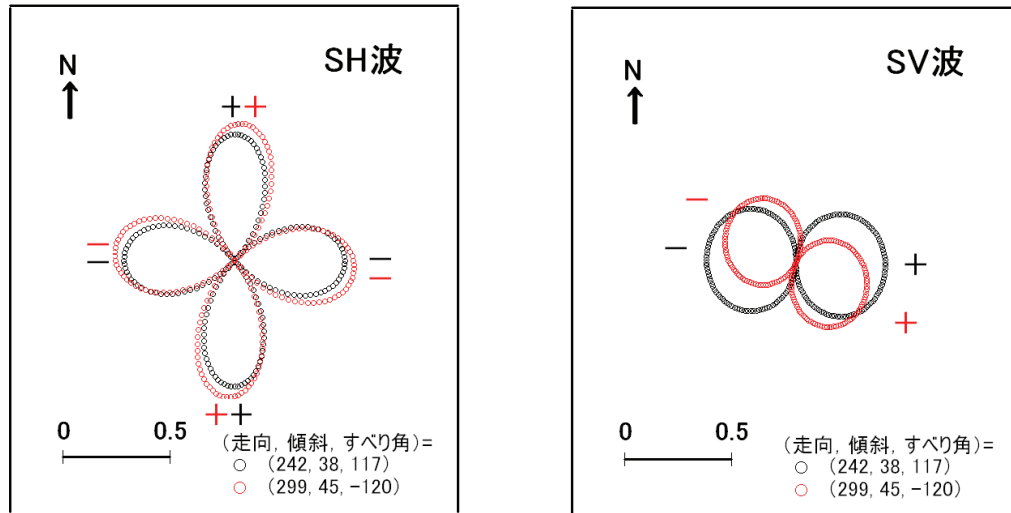


図4 余震分布と整合的な走向299°、傾斜45°、すべり角-120°を仮定した場合と、既往のCMT解<sup>14)</sup>に基づく走向242°、傾斜38°、すべり角117°を仮定した場合の射出角90°の方向(すなわち水平方向)へのSH波とSV波のラディエーション係数。

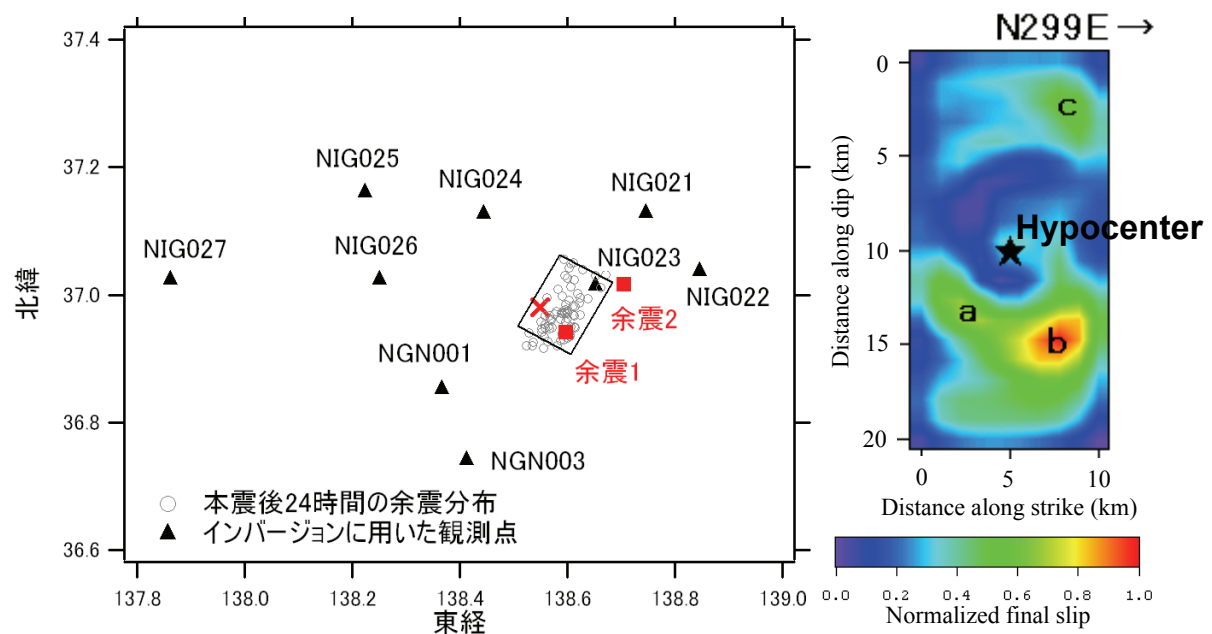


図5 左はインバージョンで仮定した断層面(長方形)とインバージョンに用いた観測点の位置(▲)および余震の震央(■)。×は参考のため横倉集落の位置を示したものである。右はインバージョンで推定された最終すべり量の分布である。

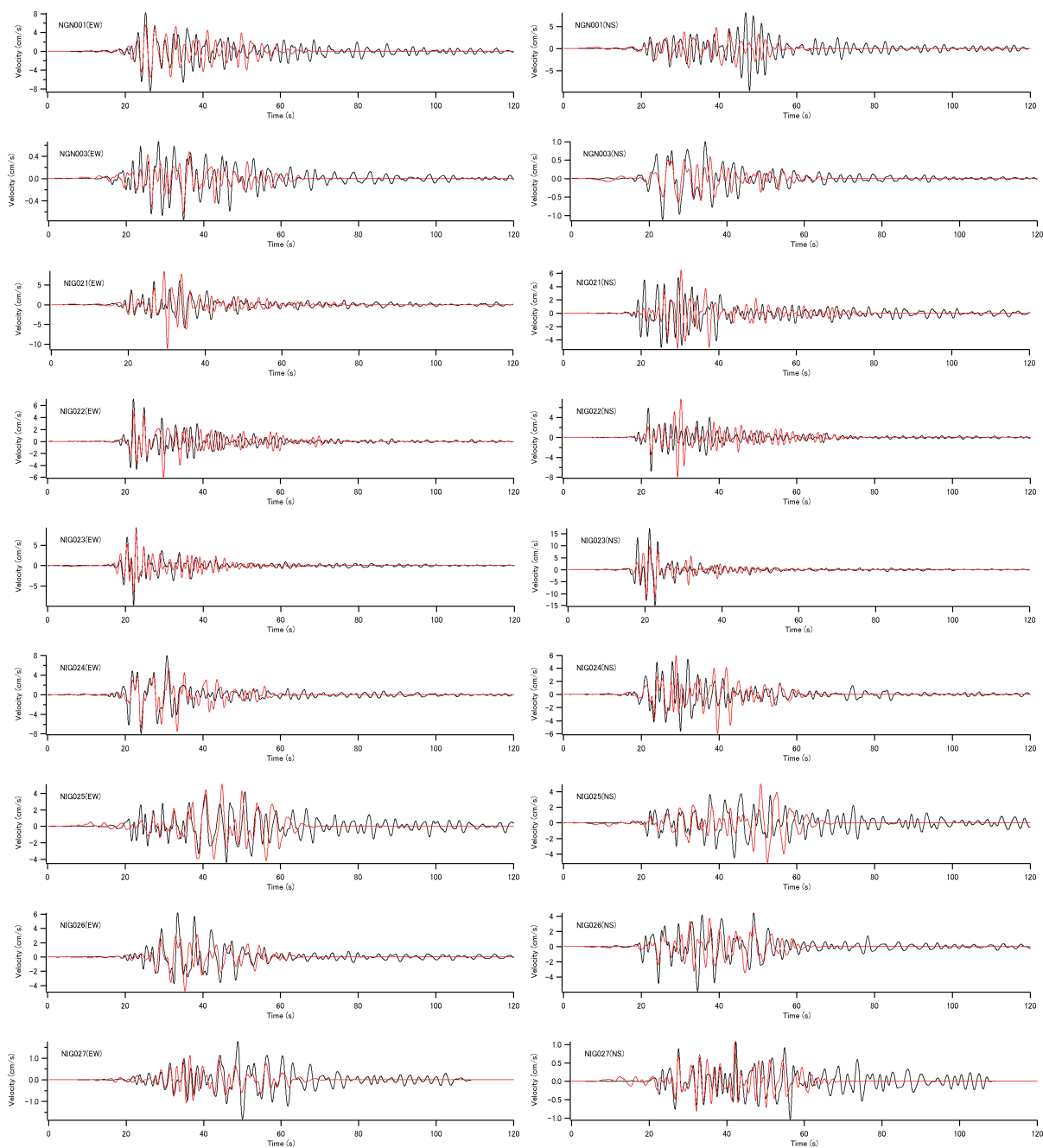


図6 観測波（黒）と合成波（赤）の比較

### 3. 横倉集落周辺における強震観測記録の整理

図7に横倉集落周辺における既存強震観測点の分布状況を示す。さらに同図には、横倉集落周辺の観測点(地表)での最大速度値PGV(3成分合成)および気象庁計測震度の分布を示す。この図より、横倉集落の最近傍の観測点である栄村役場では、100cm/sを上回る強震観測記録が得られており、横倉集落においても比較的大きな地震動が作用したものと考えられる。しかしながら、図8に示すとおり横倉集落と栄村役場は、2~3km程度離れていることから、両地点でのサイト特性の差異などに起因して、横倉集落と栄村役場では、地震動特性が異なっている可能性がある。



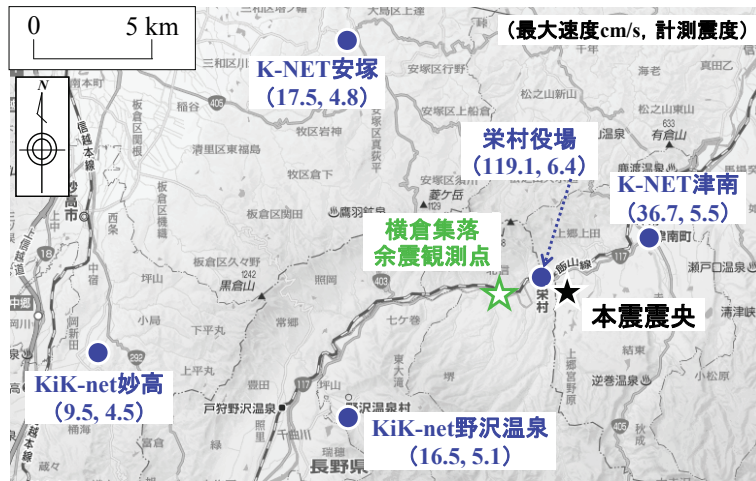


図7 最大速度(3成分合成)と計測震度の分布

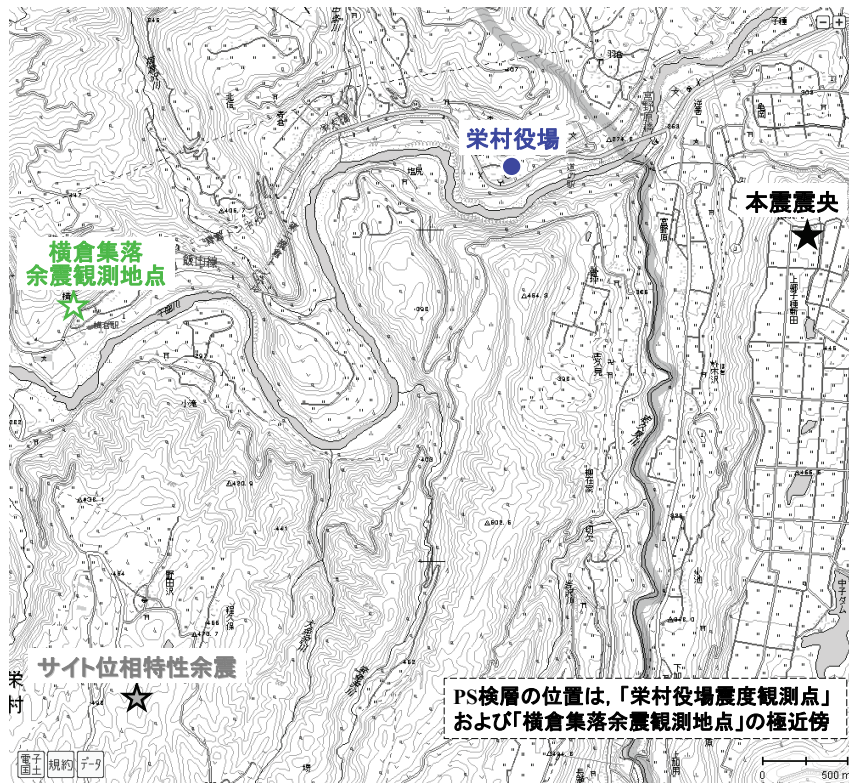


図8 横倉集落と栄村役場の位置関係

#### 4. サイト特性の評価

##### 4.1 余震(中小地震)観測

横倉集落でのサイト特性を評価するため、図7、図8、図9および写真1に示す位置において余震(中小地震)観測を行った。地震計は、加速度計(一体型微動探査兼地震計機器<sup>18)</sup>)を採用し、サンプリング周波数は100Hzとした。トリガー加速度レベルは設定せず、常時観測を継続した。観測方向は、NS、EW、UDの3成分であり、観測期間は、2011年4月1日～4月19日である。なお、バッテリーに依存した電源供給システムを採用したため、一部の余震(中小地震)については、観測記録が得られていない。すなわち、地震計は、約10時間程度のバッテリー容量を有しているものの、電欠後からバッテリー交換までの時間帯に相当する欠測時間帯がある。

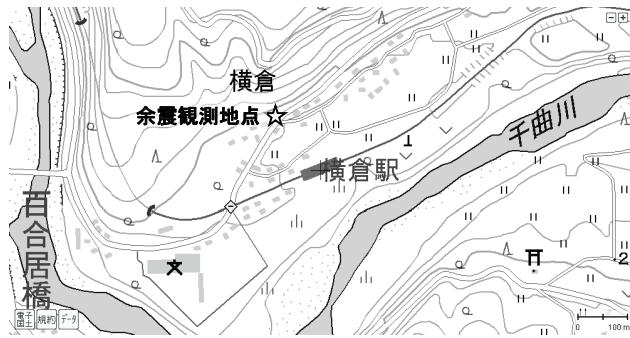


図9 横倉集落での余震観測位置



写真1 横倉集落での余震観測状況

#### 4.2 サイト増幅特性

図10に横倉集落におけるサイト増幅特性(地震基盤～工学的基盤)と、その周辺の強震観測点におけるサイト増幅特性(地震基盤～工学的基盤)を示す。横倉集落における水平方向のサイト増幅特性は、フーリエスペクトルの低周波側の形状に着目する方法<sup>19)</sup>を用いて、0.2Hz以上で精度の確保できている遠方で発生した中小地震観測記録を選定し(表2参照)、既存強震観測点とのスペクトル比に基づいて設定<sup>20)</sup>した。具体的には、横倉集落とK-NET津南で同時に得られた中小地震観測記録(記録の全長)を対象に、距離の差異による補正(幾何減衰と非弾性減衰<sup>21),22)</sup>の差異による補正)を考慮したフーリエスペクトルの比率(横倉集落/K-NET津南)を計算し、この比率をK-NET津南における既存のサイト増幅特性<sup>23)</sup>に掛け合わせることで地震基盤～地表相当のサイト増幅特性を設定した。そして、得られたサイト増幅特性(地震基盤～地表)を、密度試験結果・PS検層結果に基づく地盤解析モデル(図11参照)による伝達関数(工学的基盤～地表)で除することによって、横倉集落におけるサイト増幅特性(地震基盤～工学的基盤)を算定した。なお、栄村役場のサイト増幅特性についても、K-NET津南と同時に得られた中小地震観測記録や密度試験結果・PS検層結果に基づく地盤解析モデル(図12参照)を用いて同様の方法により評価した。また、鉛直方向のサイト増幅特性については、工学的基盤相当に変換後の中小地震観測記録によるフーリエスペクトルの比率(鉛直/水平)を水平方向のサイト増幅特性(図10(左))に乗じることによって設定<sup>24)</sup>した。なお、鉛直地震動については、P波に対応する線形の重複反射理論を用いて工学的基盤相当の地震動に変換した。ここで、図11および図12に示すように、せん断波速度 $V_s=300\text{m/s}$ 以上が連続する地盤を工学的基盤とした。

図4に示すとおり、1.5～3.0Hz付近の周波数帯域において、横倉集落と栄村役場におけるサイト増幅特性に比較的大きな差異が生じる傾向が見受けられ、鉛直方向ではその傾向がより顕著に表われている。すなわちこれは、横倉集落と栄村役場では本震時の地震動が異なっていた可能性を示しており、横倉集落におけるサイト特性を考慮して本震時の地震動を推定する必要性が高いことを示唆している。

#### 4.3 サイト位相特性

本研究では、地震動推定手法としてサイト増幅・位相特性を考慮する方法(サイト特性置換手法<sup>6)</sup>)を採用した。そのため、サイト位相特性の設定も必要となる。そこで、本震のフーリエ位相特性と近いフーリエ位相特性を有する余震記録を、横倉集落や既存強震観測点の記録の中から抽出した。具体的には、図13に示す2011年4月18日3時20分に発生した長野県北部の地震(Mj2.8: 図8参照)による観測記録を選定した。図14に、栄村役場での地震観測記録を利用してサイト位相特性の評価に用いた余震の妥当性を検討した結果を示す。同図中の観測波とは、栄村役場での本震観測記録を地盤の非線形性<sup>25)</sup>を考慮した等価線形解析<sup>26)</sup>を適用して、工学的基盤相当の地震動に変換した波形である。一方で、置換波とは、観測波のフーリエ振幅特性(工学的基盤相当波)を用いて、フーリエ位相特性のみ長野県北部の余震(2011/04/18 03:20 Mj2.8)のフーリエ位相特性(工学的基盤相当波)に置き換えた合成速度波形である。なお、両波形は、ともに0.2～2.0Hzのバンドパス・フィルタを施した速度波形となっている。

図14に示すとおり、全3成分について観測波と置換波の波形が概ね類似していることが読み取れる。なお、同様の検討を他の既存強震観測点(K-NET安塚、KiK-net妙高、KiK-net野沢温泉、K-NET津南)にお



いても実施し、観測波と置換波が概ね類似することを確認した。位相特性が波形の形状に大きく影響することを考えると、波形が類似しているということは、位相特性も類似していると推論できる。したがって、選定した長野県北部の余震(2011/04/18 03:20 Mj2.8)による位相特性は、本震の位相特性に比較的近いと推論できる。さらに、後述するように長野県北部の余震(2011/04/18 03:20 6km Mj2.8)は、横倉集落や栄村役場に最も影響を及ぼしたと考えられるアスペリティ(図5(右)の領域c)の近傍を震源とする余震である。

表2 サイト増幅特性の評価に用いた中小地震観測記録

発生年月日	発生時刻	発生地域	気象庁マグニチュードMj
2011/04/11	17:16	福島県浜通り	Mj7.0
2011/04/11	20:42	茨城県北部	Mj5.9
2011/04/12	08:08	千葉県東方沖	Mj6.4
2011/04/12	14:07	福島県中通り	Mj6.4
2011/04/16	11:19	茨城県南部	Mj5.9

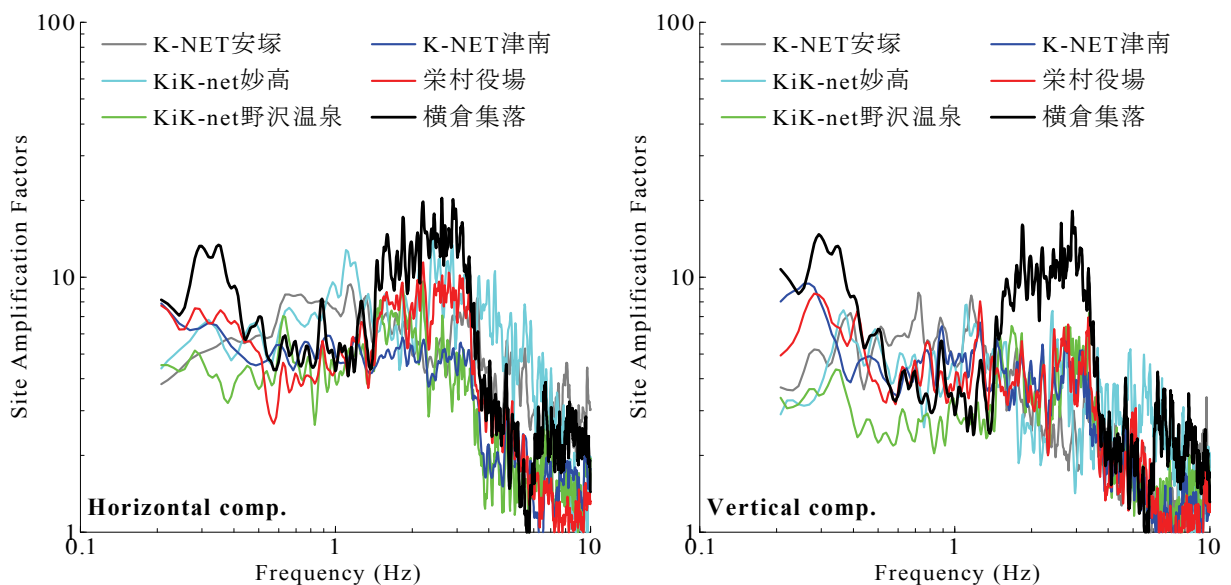


図10 サイト増幅特性の評価(地震基盤～工学的基盤)

土層性状	層厚 (m)	深度 (m)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)
表土	0.8	0.8	1.82	390	170
粘性土 (砂混じり)	3.7	4.5	1.84	510	230
砂礫	4.2	8.7	1.98	530	260
粘性土	1.7	10.4	1.88	510	240
粘性土 (砂混じり)	2.3	12.7	2.02	520	210
礫質土	2.1	14.8	2.05	690	280
工学的基盤			2.10	830	310

図11 横倉集落での表層地盤モデル

土層性状	層厚 (m)	深度 (m)	密度 (t/m <sup>3</sup> )	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)
シルト	2.1	2.1	1.80	550	240
粘性土 (砂混じり)	3.7	5.8	1.78	590	220
砂礫	2.0	7.8	1.84	700	270
礫質土	2.6	10.4	2.04	720	260
工学的基盤			2.14	880	350

図12 栄村役場での表層地盤モデル

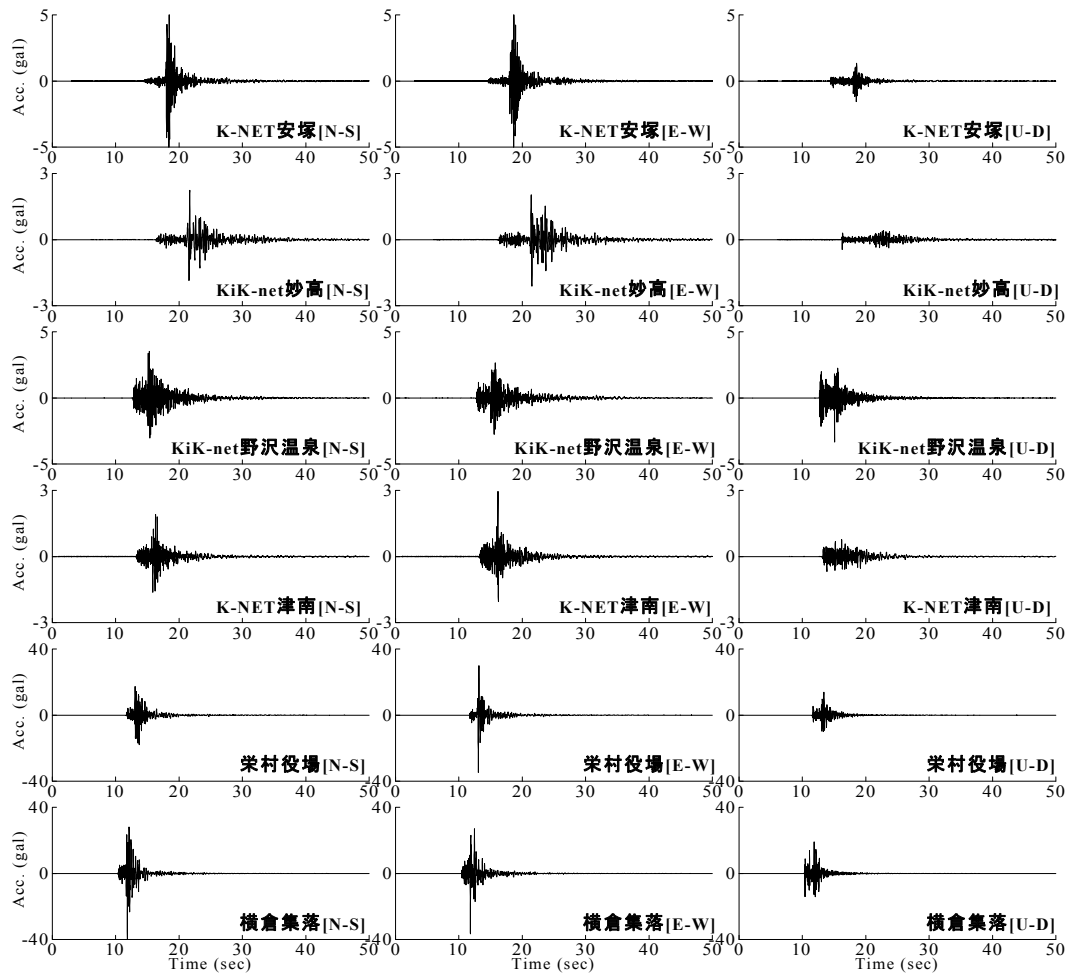


図13 長野県北部の余震(2011/04/18 03:20 Mj2.8)により観測された加速度波形

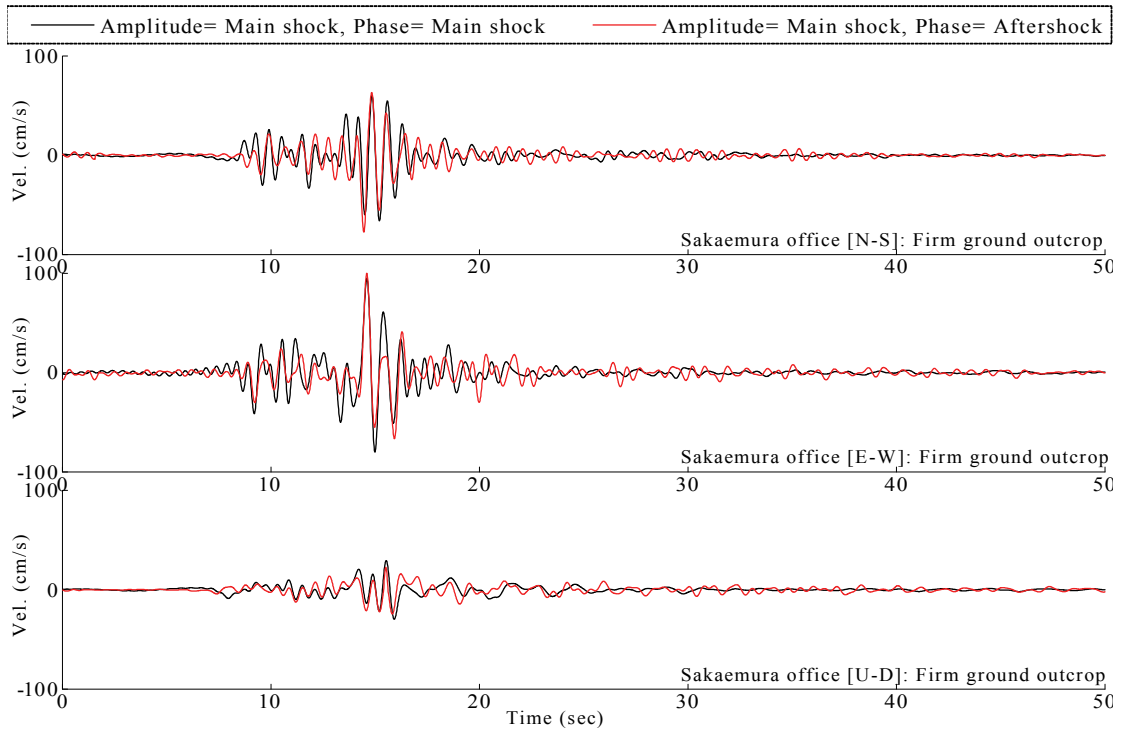


図14 栄村役場での地震観測記録を利用したサイト位相特性の適用性の評価

## 5. 横倉集落周辺の観測点での地震動推定

### 5.1 推定手法

本研究では、サイト特性置換手法<sup>9)</sup>を用いて、横倉集落およびその周辺の既存強震観測点(以後、推定点とよぶ)における地震動の推定を行った。この手法は、推定点周辺における基準観測点で得られた本震観測記録に対し、サイト増幅特性の補正を行うことにより推定点における本震時の地震動のフーリエ振幅を推定し、一方、推定点における本震時の地震動のフーリエ位相は、推定点で観測された余震等の中小地震観測記録のフーリエ位相を直接適用することにより、推定点における本震時の地震動を推定する手法である。

図15および図16に地震動推定の一連の流れを示す。まず、基準観測点としては、横倉集落に最も近い観測点である栄村役場を選定した。そして、栄村役場における地表の本震観測記録に対して地盤の非線形性<sup>25)</sup>を考慮した等価線形解析<sup>26)</sup>を適用して、工学的基盤相当の地震動を計算した。

次に、栄村役場での工学的基盤相当波(記録の全長)のフーリエ振幅を計算し、これに栄村役場と推定点の距離の差異による補正(幾何減衰と非弾性減衰<sup>21),22)</sup>の差異による補正)を施し、さらに、栄村役場と推定点のサイト増幅特性(図10参照)の比を乗じることにより、推定点の工学的基盤におけるフーリエ振幅を推定した。すなわち、この推定方法の一連の流れを示すと図16のようになる。まず、栄村役場での観測地震動から地震基盤での地震動のフーリエ振幅を推定する。次に、距離の違いによる補正を施すことで、推定点における地震基盤での地震動のフーリエ振幅を推定する。最後に、地震基盤での地震動に対して推定点のサイト増幅特性を掛け合わせることで、推定点における工学的基盤での地震動のフーリエ振幅を推定する。その際、3成分(NS、EW、UD成分)それぞれについて同様の計算を行った。

最後に、得られたフーリエ振幅と推定点における余震記録のフーリエ位相を組み合わせ、因果性を考慮したフーリエ逆変換<sup>27)</sup>を実施する(Parzen Windowによりスペクトルを平滑化することで、因果性を満足した地震波を生成することが可能<sup>27)</sup>である)ことにより、推定点における本震時の地震動(工学的基盤相当波)を推定した。なお、このとき用いる余震記録としては、上記で選定した長野県北部の余震(2011/04/18 03:20 Mj2.8)における推定点での記録(工学的基盤相当に引戻した2E波)を採用した。

### 5.2 周辺の観測点での地震動推定結果

図17に横倉集落周辺の既存強震観測点における本震時の速度波形(観測波)と地震動推定結果(推定波)を比較したものを示す。なお、両波形は、ともに0.2~2.0Hzのバンドパス・フィルタを施した速度波形(工学的基盤相当波)となっている。ここに、推定波における距離の差異による補正<sup>21),22)</sup>については、気象庁発表の震源からの距離に基づいて実施した。また、観測波については、地表面で得られている本震観測

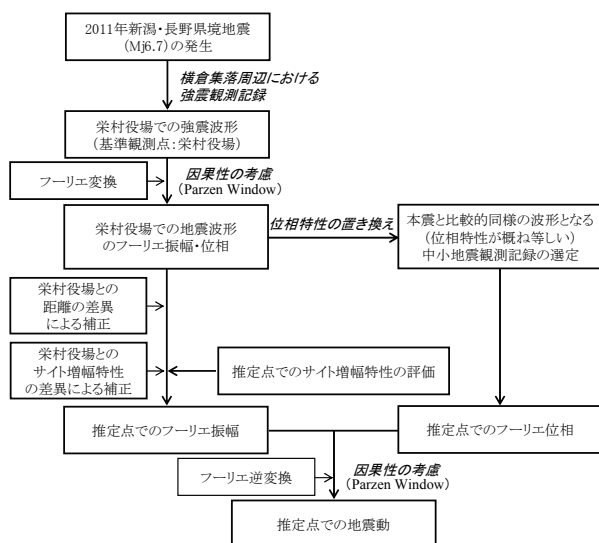


図15 地震動推定フロー

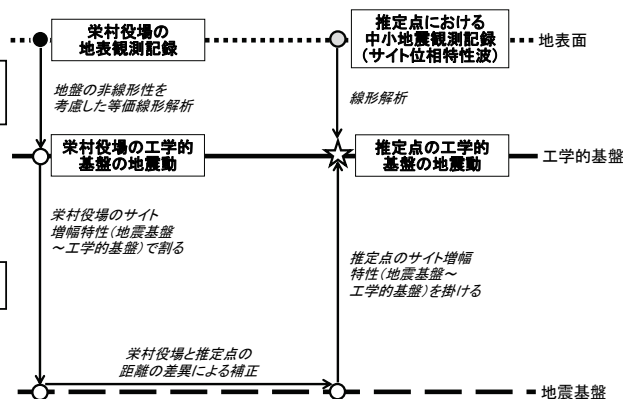


図16 地震動推定の一連の流れ

記録に対して等価線形解析<sup>26)</sup>を適用して、工学的基盤相当の地震波形を計算した。このとき、工学的基盤以浅の地盤には代表的な動的変形特性<sup>25)</sup>を採用した。

図17に示すとおり、強震観測点ごとのサイト増幅特性やサイト位相特性の違いにより、観測点間の振幅や波形形状の違いは大きいにも関わらず、全体として推定波は比較的良好に観測波を再現できている。したがって、上述した横倉集落におけるサイト増幅・位相特性を入力データとしてサイト特性置換手法を適用すれば、本震時における横倉集落での強震波形を高精度で推定できる可能性が高いと考えられる。

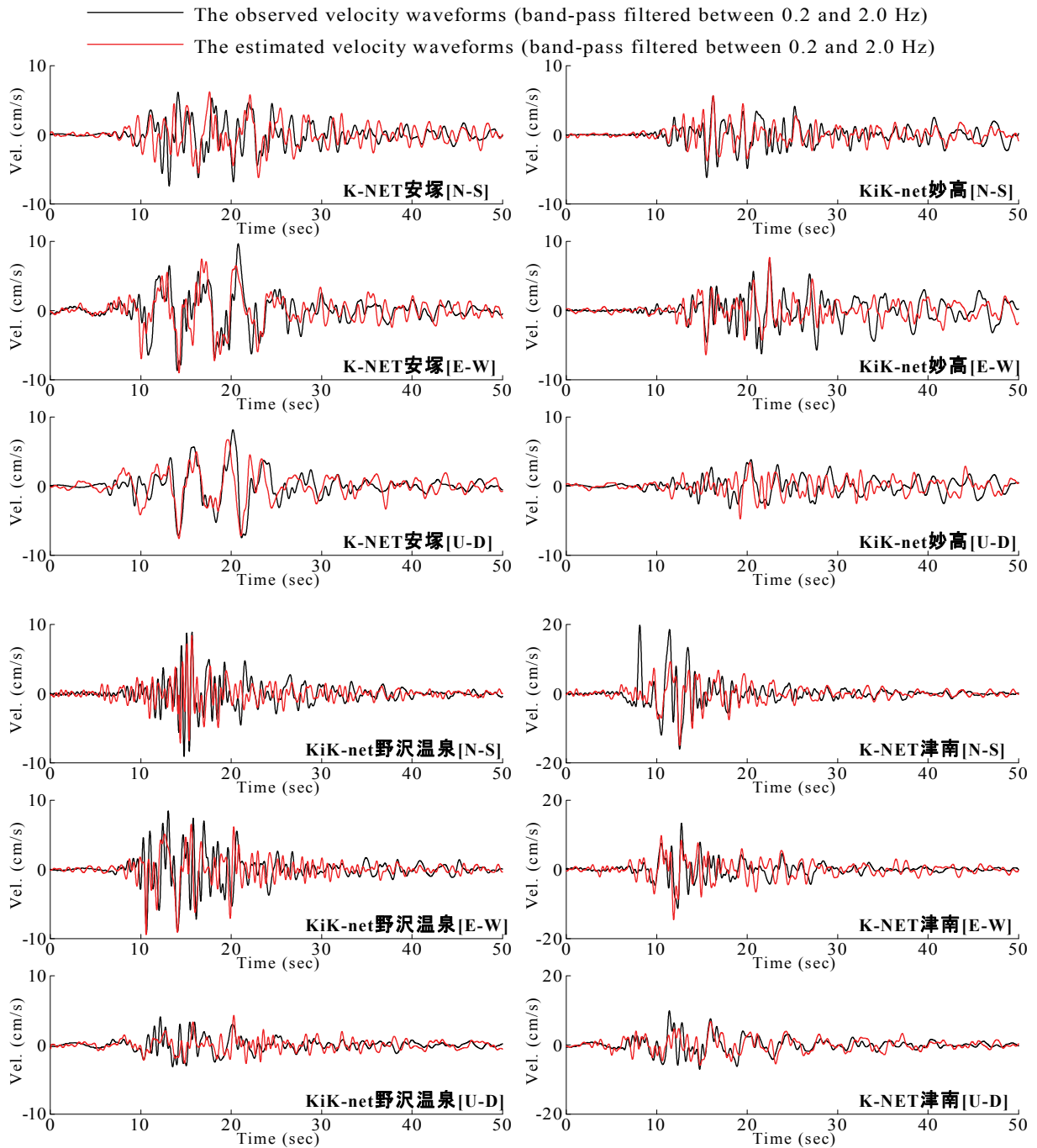


図17 横倉集落周辺の既存強震観測点における地震動の再現



ただし、より詳細に見ると、K-NET津南のケースでは、観測波を過小に評価する傾向にあり、この傾向はNS成分等で顕著に表われている。K-NET津南は、ここで対象とした観測点の中では最も震源に近く、距離の取り方の影響を受けやすい観測点である。地震の震源は実際には点ではなく面的な広がりを持っており、その面上には、強震動に対して支配的となるアスペリティが存在することが一般的である。このアスペリティが気象庁発表の震源からやや離れた所にあるならば、距離の差異による補正<sup>21),22)</sup>については、上述した震源距離ではなく、アスペリティからの距離に基づいて実施したほうが自然である。そこで、次章の6.において、横倉集落における地震動を推定する際、距離の取り方に関する議論をより詳細に実施する。

## 6. 横倉集落における地震動の推定

2. で実施した波形インバージョンの結果(図5(右))によると、震源より深部(北東)にあたる領域aと領域b、それに、震源より浅部(南西)にあたる領域cにアスペリティが存在していたと推定される。気象庁発表の震源(★)付近ではすべり量は小さい。図18(右)には、領域a~cの中心の座標を読みとってプロットしている。領域aおよび領域bは、栄村役場および横倉集落から比較的遠いので、これらの地点における地震動に対して大きく寄与していたとは考えにくい。実際、図5(右)の震源モデルに基づいて横倉集落での地震動に対する浅部と深部の寄与を計算すると、建物被害と関連の深い0.5~1.0Hzでのフーリエスペクトルの平均値は、浅部に対して深部は30%程度となり、深部の寄与は比較的小さいことがわかる。

図18(右)には4.3節で用いた余震(2011/04/18 03:20 Mj2.8)の震央も示しているが、これは領域cに比較的近い。4.3節で示したように栄村役場における本震と上記余震のフーリエ位相特性は類似しているが(図14参照)、このような類似は、本震と余震との間で伝播経路特性とサイト特性が共有されている場合に生じると考えられる。従って、本震の断層面上で栄村役場の地震動に大きく寄与した部分と、上記余震の震源とは互いに近接していたものと考えられる。このことも、栄村役場および横倉集落の地震動に対して領域cが大きく寄与していたことを裏付けるものである。以上のことから、ここでは、横倉集落における地震動を推定するにあたり、領域cからの距離を基準とすることとした。

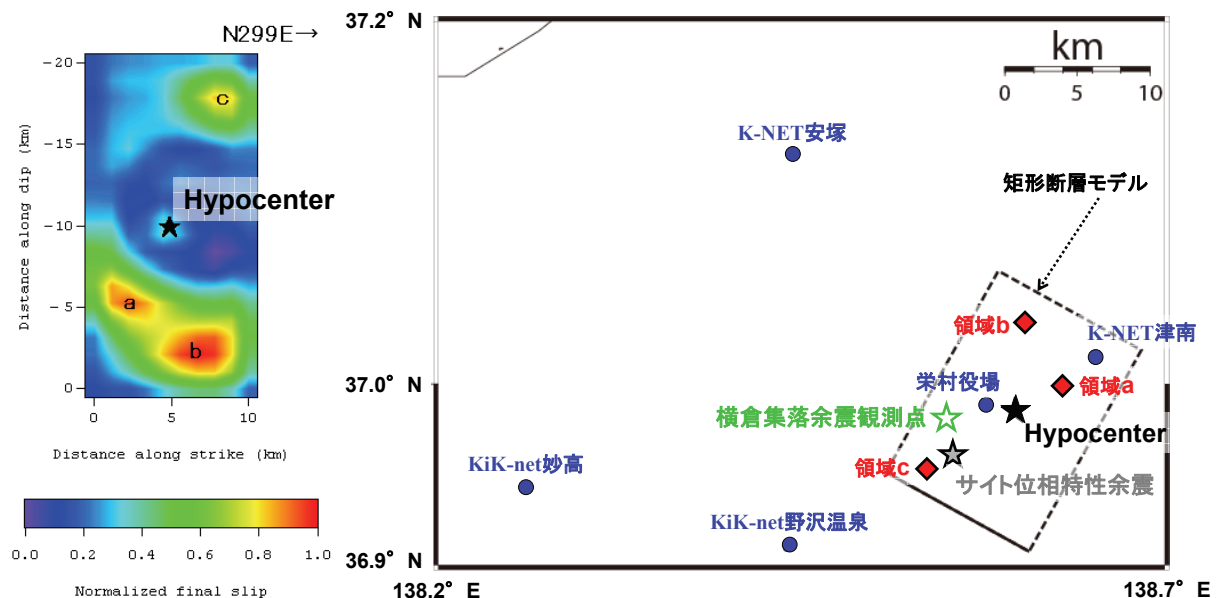


図18 インバージョンで推定された最終すべり量と矩形断層モデル

図19(左)は、本震時の横倉集落における推定速度波形(工学的基盤相当波)である。また、図19(右)には、比較対象として栄村役場での本震観測記録の工学的基盤相当波も示している。図19に示すように、工学的基盤での速度波形(特に水平2成分)では、横倉集落と栄村役場で波形形状は比較的類似しているものの、速度ピーク値については、3成分ともに横倉集落のほうが大きくなっており、EW成分では100cm/sを上回る非常に大きな速度ピーク値を示している。図20(左)は、本震時の横倉集落における推定加速度波形(地表面相当波)であり、横倉集落での地盤解析モデル(図11参照)に対して、工学的基盤相当の推定地震動を入力することで、地盤の非線形性<sup>25)</sup>を考慮した等価線形解析<sup>26)</sup>を適用して算定した。一方で、図20(右)には、比較対象として栄村役場での本震記録(地表面観測波)についても同時に示している。図20に示すとおり、横倉集落では2G程度のピークを有する加速度波形となっており、波形形状についても横倉集落と栄村役場では比較的大きな差異が生じている。

また、気象庁計測震度を計算すると、栄村役場における6.4(震度6強：観測値)に対して、横倉集落では6.8(震度7)と算定され、横倉集落のほうが大きく上回る結果となった。さらに、被害との対応がより良好と考えられる境ほか<sup>7)</sup>による修正計測震度を計算すると、栄村役場における6.08に対して、横倉集落では6.55となる。実際の木造住家の全壊率<sup>3)</sup>の違いに着目すると、栄村役場のある森地区では10%以下であるのに対して、横倉集落では30%を超えているのが報告<sup>3)</sup>されており、観測地震動(栄村役場)に対する推定地震動(横倉集落)の大きさの違いと矛盾していないだけでなく、境ほか<sup>7)</sup>による修正計測震度を用いた被害関数との対応も良好である。

図21および図22は、横倉集落での地表面加速度波形による速度応答スペクトルならびに加速度応答スペクトル(ともに減衰5%)である(図20に示す50秒間から計算)。これらの図には比較対象として、栄村役場(2011年長野・新潟県境地震)、JR鷹取のEW成分(1995年兵庫県南部地震)、KiK-net日野のNS成分(2000年鳥取県西部地震)、川口町役場のEW成分(2004年新潟県中越地震)の応答スペクトルについても同時に示している。横倉集落の応答スペクトルは、各成分において栄村役場での応答スペクトルを包絡しているのが確認できる。また、既往の大規模地震における強震観測記録との比較では、JR鷹取や川口町役場(ともに水平成分)に見られる1.0~2.0secの周期帯における応答スペクトルの卓越は、横倉集落では見受けられないが、概ね0.1~1.0secの周期帯でJR鷹取と川口町役場の応答スペクトルを上回っている。一方で、横倉集落とKiK-net日野における応答スペクトルの形状が3成分ともに比較的類似しているのが確認できる。

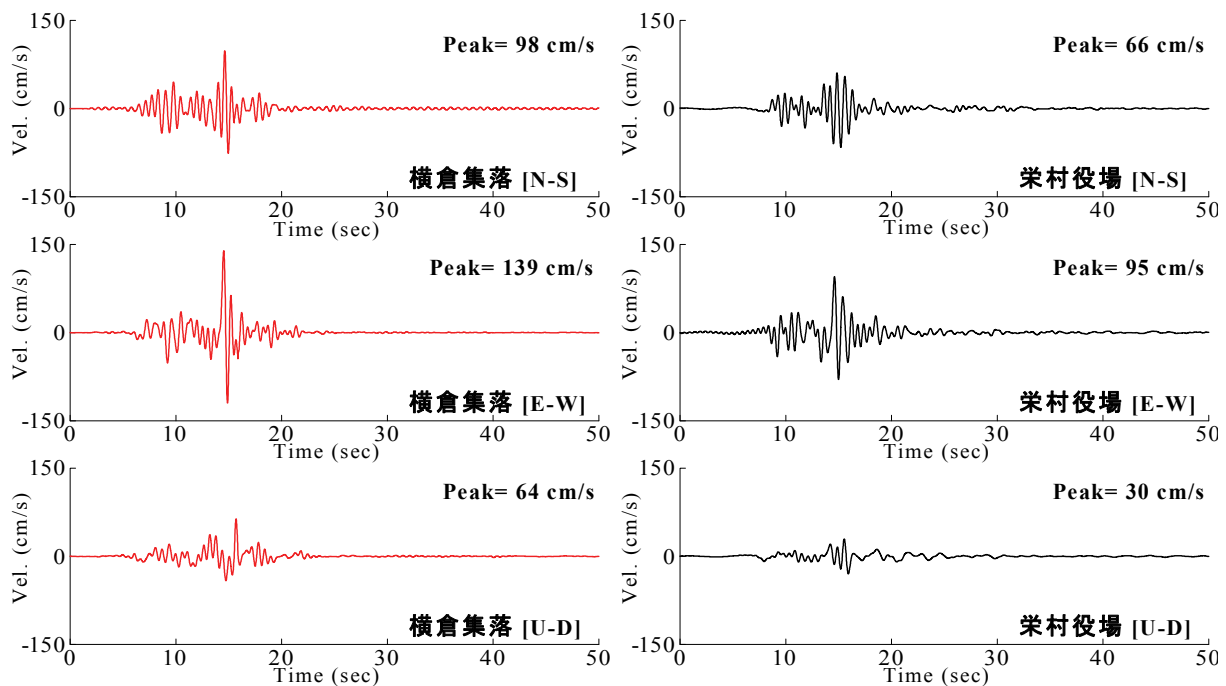


図19 横倉集落における推定地震動と栄村役場における観測地震動の比較  
(工学的基盤相当の速度波形：0.2~2.0Hz)

## 7. まとめ

本研究では、サイト特性置換手法を用いて、2011年長野・新潟県境地震での横倉集落における強震波形を推定した。得られた知見を以下に示す。

- 横倉集落と周辺の既存強震観測点では、サイト特性が異なっており、横倉集落におけるサイト特性を考慮して本震時の地震動を推定する必要性が高いことが示唆される。

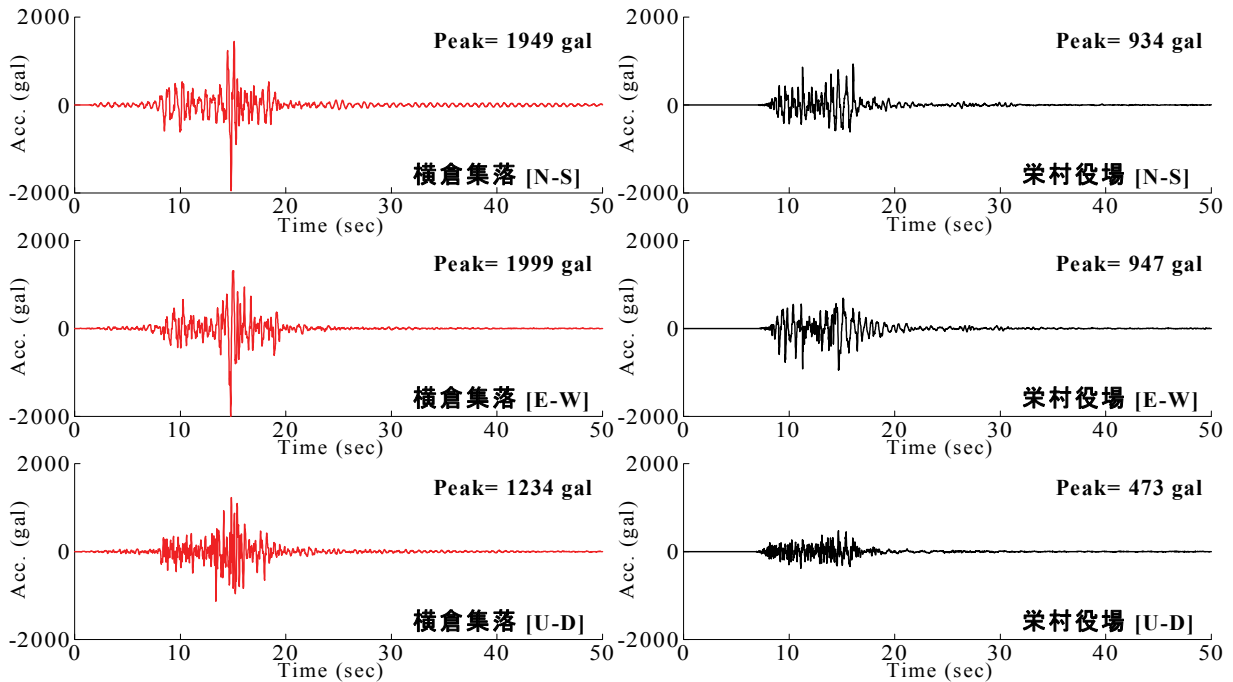


図20 横倉集落における推定地震動と栄村役場における観測地震動の比較（地表面相当の加速度波形）

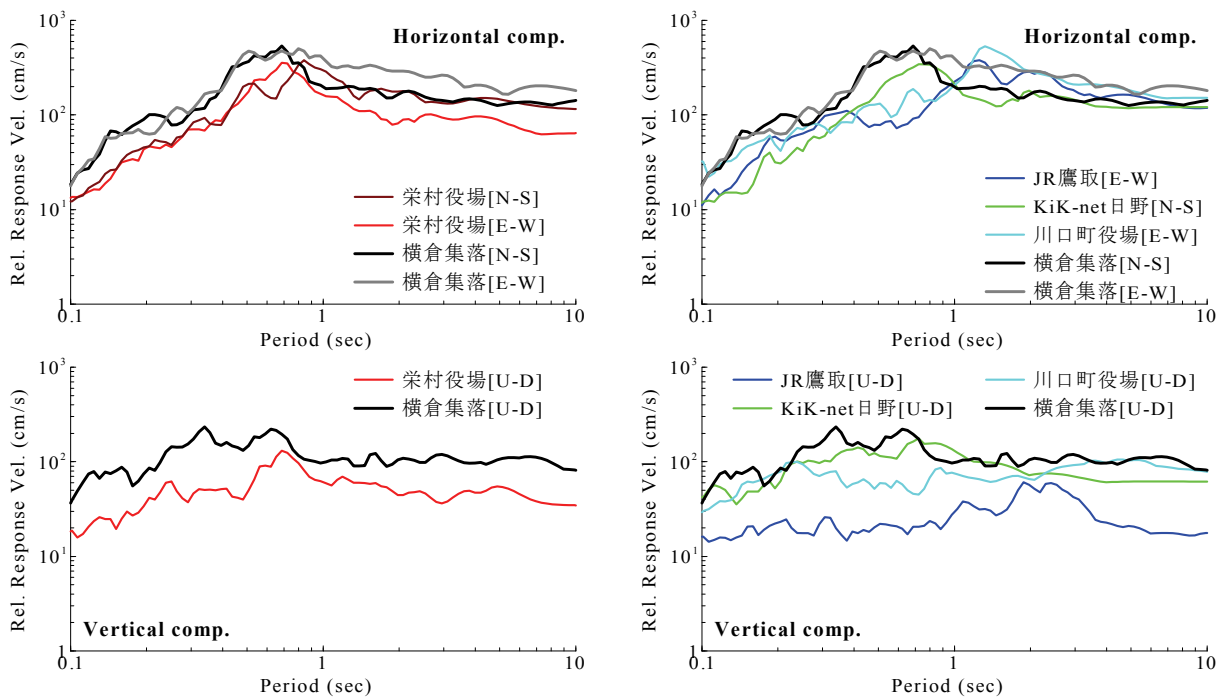


図21 速度応答スペクトルの比較

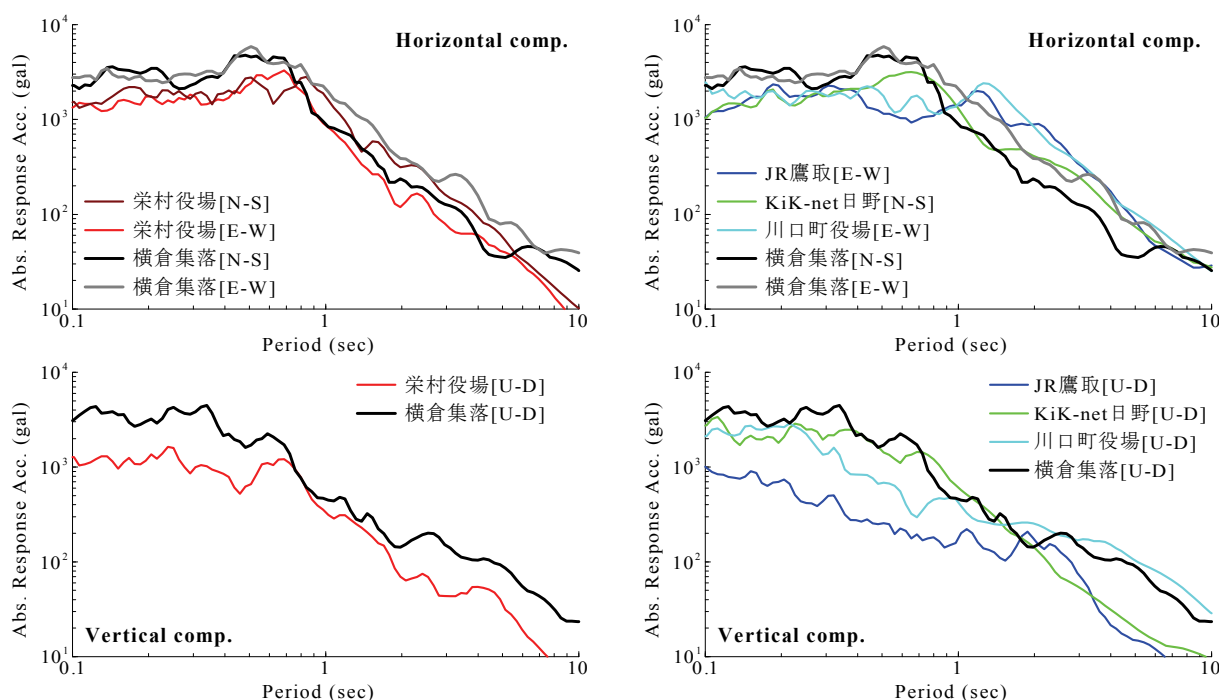


図22 加速度応答スペクトルの比較

- ・ 波形インバージョンの結果、および、本震と余震の位相特性の類似性に関する検討結果から、2011年長野・新潟県境地震における横倉集落周辺の地震動に対しては、気象庁発表の震源よりも浅い位置に存在するアスペリティが大きく寄与したものと推察される。
- ・ 横倉集落での推定地震動と、栄村役場での観測地震動を比較すると、速度波形および加速度波形ともに、横倉集落のほうが大きな地震動特性を有しており、気象庁計測震度は、横倉集落において6.8(震度7)と推定され、栄村役場の観測値である6.4(震度6強)を上回る。また、修正計測震度<sup>7)</sup>は、栄村役場での6.08に対して、横倉集落では6.55と推定され、横倉集落において多くの住家被害が発生している事実<sup>3)</sup>と矛盾していない。修正計測震度を用いた被害関数<sup>7)</sup>との対応も良好である。
- ・ 両地点でのサイト特性の差異などに起因して、横倉集落での応答スペクトルが栄村役場での応答スペクトルを各成分で上回る。さらに、横倉集落での応答スペクトルは、1.0~2.0secの周期帯における卓越は見受けられないものの、2000年鳥取県西部地震におけるKiK-net日野での応答スペクトル(NS成分)とスペクトル形状が類似している。

今後は、推定した地震動を入力した動的解析などを実施し、横倉集落における住家などの被災機構の解明を進めていく予定である。

## 謝 辞

本研究では、(独)防災科学技術研究所K-NET/KiK-netによる地震観測波形、F-netのCMT解、気象庁の震源データを使用させていただきました。また、長野県栄村役場の皆様には、地震観測波形データの提供や横倉集落における余震観測の実施などにおいて多大なるご支援をいただきました。さらに、本研究の遂行にあたっては、五十田博教授(信州大学)をはじめとする(社)日本建築学会北陸支部災害連絡部会の皆様にご協力いただきました。三名の匿名査読者からの意見により本稿は大きく改善されました。ここに記して深く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 平野廣和: 関東および甲信越地域の被害概要, 震災特集東日本大震災, 土木学会誌, Vol.96, No.6, 2011年, pp.24-26.



- 2) たとえば, 村田晶, 清水秀丸, 須田達, 向坊恭介: 平成23年(2011年)長野県北部を震源とする地震ー日本建築学会北陸支部初動調査による被害速報ー, 東北地方太平洋沖地震および一連の地震緊急調査報告, (社)日本建築学会, 2011年.
- 3) 山田真澄, 山田雅行, 福田由惟, スマイス・クリスティン, 藤野義範, 羽田浩二: 2011年長野県北部の地震の震源近傍における高密度の地震動推定と木造建物被害との比較, 日本地震工学会論文集, Vol.12, No.1, 2012年, pp.20-30.
- 4) 山田真澄, 山田雅行, 福田由惟, スマイス・クリスティン, 香川敏幸, 藤野義範, 羽田浩二: 2011年長野県北部の震源近傍における高密度の地震動推定と建物被害との比較, 日本地震学会講演予稿集2011年度秋季大会, B21-09, 2011年, pp.57.
- 5) 前田寿朗, 木村友彦, 加藤敦士: 2011年長野県北部地震の栄村被害に関連した微動測定結果, 日本地震工学会・大会-2011梗概集, 2011年, pp.488-489.
- 6) たとえば, Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake based on site amplification and phase characteristics, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.101, No.2, 2011, pp.688-700.
- 7) たとえば, 境有紀, 瀨瀬一起, 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, 2002年, pp.85-91.
- 8) 野津厚: 2004年新潟県中越地震の震源モデルー経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンー, 地震2, Vol.58, 2005年, pp.329-343
- 9) 野津厚: 2005年福岡県西方沖の地震の震源モデルー経験的グリーン関数を用いた波形インバージョンー, 地震2, Vol.59, 2007年, pp.253-270
- 10) Kato, A., E. Kurashimo, N. Hirata, S. Sakai, T. Iwasaki, and T. Kanazawa: Imaging of the source region of the 2004 mid-Niigata prefecture earthquake and the evolution of a seismogenic thrust-related fold, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.32, 2005, L07307, 10.1029/2005GL022366.
- 11) Kato, A., S. Sakai, E. Kurashimo, T. Igarashi, T. Iidaka, N. Hirata, T. Iwasaki, T. Kanazawa, and Group for the aftershock observations of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake: Imaging heterogeneous velocity structures and complex aftershock distributions in the source region of the 2007 Niigataken Chuetsu-oki Earthquake by a dense seismic observation, *Earth Planets Space*, Vol.60, 2008, pp.1111-1116.
- 12) Wald, D.J., T.H. Heaton, and K.W. Hudnut: The slip history of the 1994 Northridge, California, earthquake determined from strong-motion, teleseismic, GPS and leveling data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.86, 1996, pp.S49-S70.
- 13) Wald, D.J.: Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data, *J. Phys. Earth*, Vol.44, 1996, pp.489-503.
- 14) (独)防災科学技術研究所: 広帯域地震観測網F-net, <http://www.fnet.bosai.go.jp/fnet> (last accessed 2011/07/27).
- 15) 気象庁報道発表資料: 平成23年3月12日03時59分頃の長野県北部の地震について, 2011年.
- 16) Hertzell, S. H. and T. H. Heaton: Inversion of strong ground motion and teleseismic wave form data for the fault rupture history of the 1979 Imperial Valley, California earthquake, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, 1983, pp.1553-1583.
- 17) Lawson, C. L. and R. J. Hanson: Solving least squares problems, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1974, 340pp.
- 18) 先名重樹, 安達繁樹, 安藤浩, 荒木恒彦, 藤原広行: 微動探査観測システムの開発, 地球惑星連合大会2006予稿集(CD-ROM), S111-P002, 2006年.
- 19) たとえば, 野津厚, 佐藤陽子, 菅野高弘: 羽田空港の地震動特性に関する研究(第2報), スペクトルインバージョンによるサイト特性, 港湾空港技術研究所報告, 第42巻, 第2号, 2003年, pp.251-283.
- 20) たとえば, (社)日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 国土交通省港湾局監修, 2007年, pp.336-341.
- 21) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, 1983, pp.1865-1894.
- 22) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.556, 2002年, pp.15-24.

- 23) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: スペクトルインバージョンに基づく全国の強震観測地点におけるサイト増幅特性とこれを利用した強震動評価事例, 日本地震工学会論文集, Vol.7, No.2, 2007年, pp.215-234.
- 24) たとえば, 秦吉弥, 一井康二, 村田晶, 野津厚, 宮島昌克: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した線状構造物における地震動の推定とその応用—2007年能登半島地震での道路被災を例に—, 土木学会論文集A, Vol.66, No.4, 2010年, pp.799-815.
- 25) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会講演集, 1985年, pp.539-542.
- 26) 杉戸真太, 会田尚義, 増田民夫: 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/III-27, 1994年, pp.49-58.
- 27) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, 土木学会論文集A, Vol.65, No.3, 2009年, pp.808-813.

(受理: 2011年 8月 1日)  
(掲載決定: 2012年 4月11日)

**Ground Motion Evaluation at Yokokura Village  
for the 2011 Nagano-Niigata Border Earthquake  
Based on the Site-effect Substitution Method**

HATA Yoshiya <sup>1)</sup>, MURATA Akira <sup>2)</sup>,  
NOZU Atsushi <sup>3)</sup> and MIYAJIMA Masakatsu <sup>4)</sup>

1) Member, Senior Researcher, R&D Center, Nippon Koei Co., Ltd., Dr. Eng.

2) Member, Assistant Professor, Faculty of Civil and Environmental Eng., Kanazawa University, Dr. Eng.

3) Member, Head of Engineering Seismology Division, Port and Airport Research Institute, Dr. Eng.

4) Member, Professor, Faculty of Civil and Environmental Eng., Kanazawa University, Dr. Eng.

**ABSTRACT**

Evaluation with high accuracy of ground motion at a damaged site is very important to analyze collapse mechanism of wooden houses. A serious disaster occurred during the 2011 Nagano-Niigata Border Earthquake. However, there were no strong motion observation stations at the wooden house damage sites during this earthquake. In this study, the seismic waveform at Yokokura Village, where a lot of wooden house damage occurred, was estimated based on empirical site amplification and phase effects. The estimated seismic waveform will be useful for rational safety assessment of wooden houses.

*Key Words: Seismic waveform, Aftershock observation, Site effects, The 2011 Nagano-Niigata Border Earthquake*