経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2014年長野県神城断層地震における 白馬村神城地区での強震波形の広域評価

秦　吉弥[1]・村田　晶[2]・野津　厚[3]・羽田　浩二[4]
山田　雅行[5]・宮島　昌克[6]・藤木　昂[7]・常田　賢一[8]

[1] 正会員　大阪大学　大学院工学研究科（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）
E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp
[2] 正会員　金沢大学　理工研究域（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail: murata@se.kanazawa-u.ac.jp
[3] 正会員　（独）港湾空港技術研究所　地震防災研究領域（〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1）
E-mail: nozu@pari.go.jp
[4] 正会員　（株）ニュージェック　建築グループ（〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東2-3-20）
E-mail: hadakj@newjec.co.jp
[5] 正会員　（株）ニュージェック　技術開発グループ（〒531-0074 大阪府大阪市北区本庄東2-3-20）
E-mail: yamadams@newjec.co.jp
[6] 正会員　金沢大学　理工研究域（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp
[7] 学生会員　大阪大学　工学部（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）
E-mail: afujiki@civil.eng.osaka-u.ac.jp
[8] フェロー会員　大阪大学　大学院工学研究科（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）
E-mail: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

2014年11月22日に発生した長野県北部を震源とする地震では，白馬村神城地区内の集落の住家等において倒壊を伴う深刻な被害が発生した．一方で，同じ神城地区内においても住家等が無被災であった集落も確認されている．神城地区内の被災集落ならびに無被災集落に作用した本震時の地震動を推定することは，宅地や木造建築物などの耐震性評価手法の精度向上などを図る上で大変有意義である．そこで本稿では，神城地区において臨時の余震観測を高密度に実施し，得られた記録に基づいてサイト特性を評価した．そして，経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法に基づき，本震時に神城地区に作用した強震波形を広域にわたり評価した結果について報告する．

Key Words : *ground motion, site effects, aftershock observation, fault model, wooden house*

1. はじめに

2014年11月22日に発生した長野県北部を震源とするマグニチュード6.7の地震（以後，2014年長野県神城断層地震[1]もしくは本震と呼ぶ）では，震源域の白馬村神城地区の集落を中心に住家の倒壊などの深刻な被災が報告[2]されている．一方で，同じ神城地区内においても住家が無被災であった集落も確認[2]されている．本震時において神城地区内の被災集落ならびに無被災集落に作用した地震動を推定することは，宅地や木造建築物などの耐震性評価手法の精度向上などを図る上で大変有意義[3]である．この点に関して著者ほか[4]は，神城地区内の田頭集落（被災集落）および飯田集落（無被災集落）において臨時の余震観測を実施し，得られた記録とサイト特性置換手法[5]を組合せに基づき，本震時に田頭集落および飯田集落に作用した地震動を推定し，両集落における推定地震動の比較結果が被災・無被災の実績に対して矛盾していないことを速報している．しかしながら，神城地区内におけるわずか二つの集落（2地点）での強震動評価に留まっていること，震源断層近傍の地点へのサイト特性置換手法の適用には課題[4,6]が残されていること，などを勘案すれば神城地区における強震動評価が十分であるとは言い難

表-1　K-NET白馬と神城地区周辺で同時に観測された主要な余震の一覧

No.	Year/Month/Day	Hour : Min. (JST)	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Depth (km)	Source region	JMA Mag.
EQ-01	2014/11/25	06:27	36.77	137.90	1	Nothern Nagano Pref.	Mj3.9
EQ-02	2014/11/28	13:13	36.74	137.88	4	Nothern Nagano Pref.	Mj3.6
EQ-03	2014/11/29	02:38	36.74	137.88	4	Nothern Nagano Pref.	Mj3.1
EQ-04	2014/12/05	15:05	36.77	137.86	5	Nothern Nagano Pref.	Mj3.0
EQ-05	2014/12/22	01:17	36.69	137.89	5	Nothern Nagano Pref.	Mj4.4

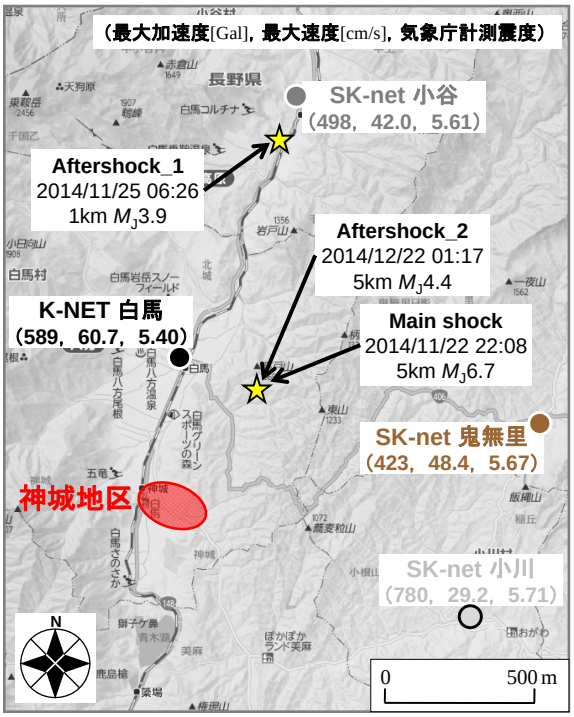

図-1　神城地区周辺の既存強震観測点で得られた本震記録，および震源域で発生した主要な余震

いのが現状である．

そこで本稿では，2014年長野県神城断層地震時に神城地区内に作用した地震動を特性化震源モデル[7]を用いて広域にわたり評価した．具体的には，まず，神城地区内の8地点（既設2地点[4]を含む）において地震計を設置し，臨時の余震観測を行った．次に，得られた余震観測記録に基づいて経験的サイト増幅・位相特性を評価した．さらに，神城地区周辺の既存強震観測点[8,9]で得られた本震記録を一定の精度で再現可能な特性化震源モデルを構築した．最後に，経験的サイト増幅・位相特性と特性化震源モデルの組合せを用いて，神城地区内の臨時余震観測点（8地点）における本震時の地震動を推定した．

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[10]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．

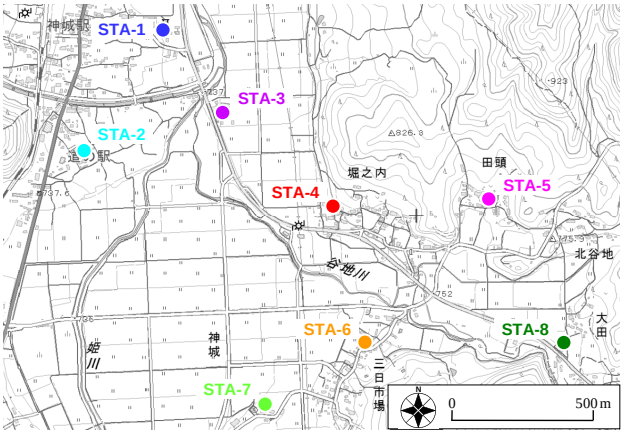

図-2　神城地区内に設けた臨時余震観測点の分布

2.　本震観測記録の整理

図-1は，神城地区周辺の本震観測記録（3成分合成最大加速度値*PGA*（Gal），3成分合成最大速度値*PGV*（cm/s），気象庁計測震度[11]）の分布状況を示す．図-1に示すとおり，地震動指標の観測値は震源（震央）から一様な距離減衰を示しておらず（例えば，震央から比較的近いK-NET白馬よりも比較的遠い他の観測点のほうが気象庁計測震度が明らかに大きくなっている），神城地区では，K-NET白馬（神城地区に最も近い既存強震観測点）などとは異なった特性の地震動が本震時に作用していた可能性が考えられる．したがって，神城地区における強震動評価において，震源特性・伝播経路特性・サイト特性の影響をそれぞれ適切に評価する必要性が示唆される．

3.　臨時余震観測の実施

図-2に神城地区内に設けた臨時余震観測点の分布を示す．地震観測は，一体型微動探査兼地震計機器[12]を地表に設置（STA-1, 4, 5, 8），もしくはボアホール型地震計[13]を地表付近に埋設（STA-2, 3, 6, 7）することで実施した．データロガーは，白山工業（株）製LS-7000XTを8つの臨時観測点（STA-1～8）において共通採用した．観測期間は，

2014年11月24日～12月13日（STA-1, 5）および2014年12月18～25日（STA-2, 3, 4, 6, 7, 8）である．観測条件（STA-1～8において共通）として，サンプリング周波数は100Hz，および観測方向はNS, EW, UDの3成分とし，トリガー加速度レベルは設定せずに，常時観測を継続するシステムとした．その結果，表-1に示すような，主要な余震観測記録がK-NET白馬と同時に得られた．

4. サイト特性の評価

(1) サイト増幅特性の評価

図-3および図-4は，神城地区周辺の既存強震観測点（図-1参照）および神城地区内の臨時余震観測点（図-2参照）におけるサイト増幅特性を重ね合せたものである．なお，本稿では全て地震基盤～地表相当のサイト増幅特性となっている．臨時観測点（STA-1～8）におけるサイト増幅特性の評価手順は以下のとおりである．まず，K-NET白馬と臨時観測点（STA-1～8）で同時に得られた地震観測記録（表-1参照）を対象に，両地点の震源からの距離の違いによる補正[14),15)]を考慮したフーリエスペクトルの比率（STA-1～8／K-NET白馬）を計算した．次に，この比率をK-NET白馬における既存のサイト増幅特性[16)]に掛け合わせることによって，臨時観測点（STA-1～8）におけるサイト増幅特性を評価[17)]した．一方で，文献16)において評価されていないSK-net観測点（SK-net小谷，SK-net鬼無里，SK-net小川）のサイト増幅特性[4)]についても，本震前の中小地震観測記録に基づき，フーリエスペクトルの比率（SK-net観測点／K-NET白馬）を計算し，上記と同様の方法を用いて評価した．

図-3と図-4を比較すると，神城地区とその周辺の既存強震観測点では，サイト増幅特性の特徴（ピーク周波数やスペクトル形状など）に比較的大きな差異が確認でき，既存観測点で得られた本震記録を，本震時に神城地区に作用した地震動として転用するのが困難であることが読み取れる．一方で，図-4に示すとおり，臨時観測点（STA-1～8）ごとにサイト増幅特性の特徴（ピーク周波数やスペクトル形状など）が異なっていることから，同じ神城地区内においても本震時に作用した地震動の特徴が異なっていた可能性が示唆される．

(2) サイト位相特性の評価

4.(1)ではサイト増幅特性（いわゆる地震波形の振幅特性）に関する比較検討を行ったが，ここではサイト位相特性（いわゆる地震波形の形状特性）に関する議論を行う．図-5は，EQ-1（図-1および表-1参照）において神城地区（STA-1, 5）と周辺の既存観測点で得られた記録の加速度

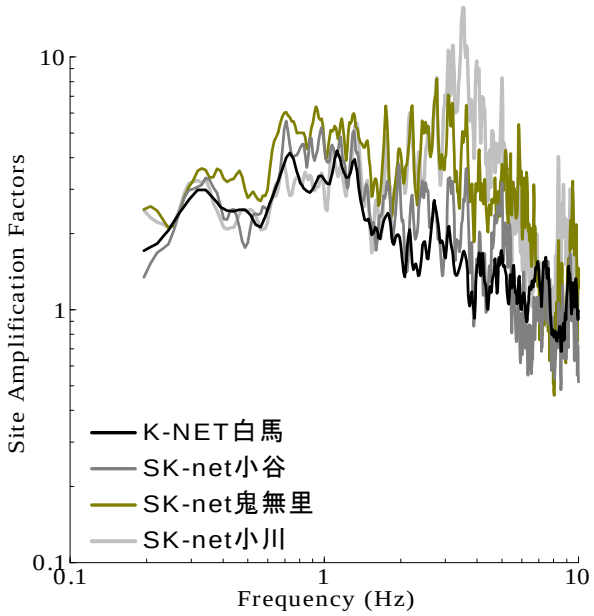

図-3　既存強震観測点におけるサイト増幅特性の比較

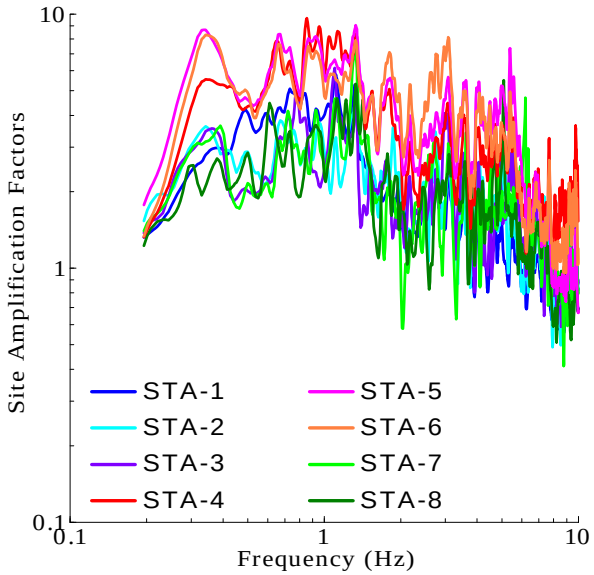

図-4　神城地区内の臨時観測点におけるサイト増幅特性の比較

時刻歴を比較したものである．同様に図-6には，EQ-5（図-1および表-1参照）によって得られた加速度波形を神城地区（STA-2, 3, 4, 6, 7, 8）と周辺の既存観測点で比較したものを示す．

図-5および図-6に示すとおり，震源断層内で発生した中小地震（余震）によって神城地区とその周辺の既存強震観測点で得られた波形を比較すると，波形形状に差異が生じていることが確認できる．さらに，同じ神城地区内においても深刻な被災が確認されている集落地点（STA-4, 5, 6）とその他の地点（STA-1, 2, 3, 7, 8）では，波形形状が明らかに異なっている．これは，サイト増幅特性とサイト位相特性の相関性[18)]や大規模地震とその後の余震によるサイト位相特性の類似性[5)]などを勘案すると，神城

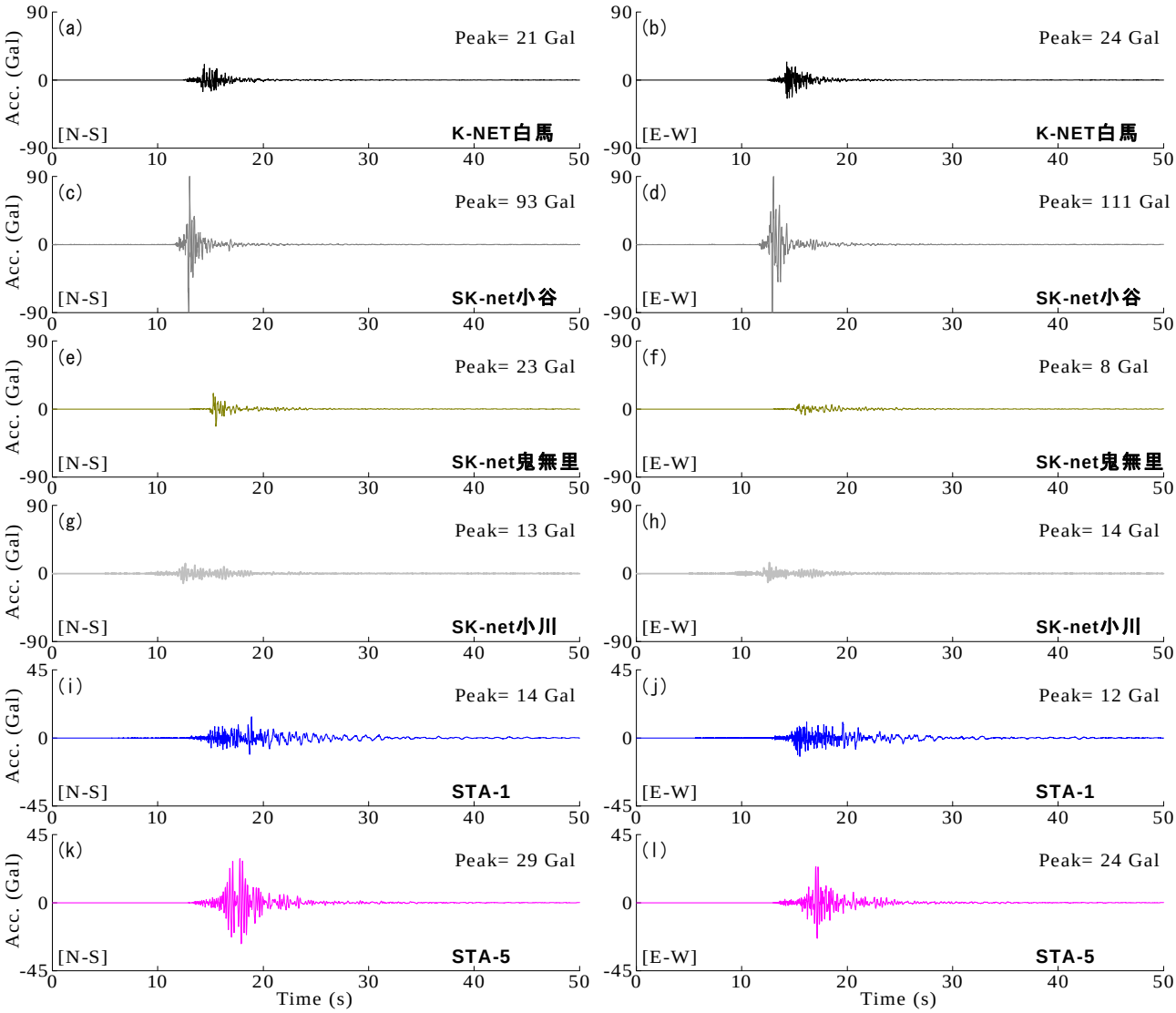

図-5　神城地区とその周辺の既存強震観測点で同時に得られた余震(EQ-1)による観測地震動(加速度波形の波形形状)の比較

地区と周辺観測点に作用した本震時の地震動特性が異なっていた可能性だけでなく，神城地区内でも被災集落と無被災集落では本震時に作用した地震動特性が異なっていた可能性を示唆するものである．

5.　強震動評価手法

(1) 特性化震源モデル

本研究では，波形インバージョンの結果[19]を参考に，**図-7**に示すような特性化震源モデルの構築[7]を行った．このモデルは，余震分布に基づいて矩形断層面を仮定し，気象庁の震源を含むように形状を設定している．断層面の長さは20kmおよび幅は20kmである．波形インバージョンによる最大すべり速度の分布[19]において，試行錯誤の結果，比較的すべり量の大きい領域に3つのサブイベント(Asperity_1, Asperity_2, Asperity_3)を配置したモデルである．具体的には，Asperity_1はK-NET白馬とSK-net小谷における観測地震動の再現性(後述)，Asperity_2, Asperity_3はSK-net鬼無里およびSK-net小川における観測地震動の再現性(後述)を考慮して設定した．**表-2**に特性化震源モデルの断層パラメターの一覧を示す．破壊伝播は，気象庁の震源から放射状に2.8km/sの速度で広がると仮定し，*Q*値については佐藤・巽による東日本の内陸部での推定値[15]を採用した．*PRTITN*については，**表-3**に示すように，既存強震観測点での強震動評価では，観測波と推定波の一致度を考慮して設定した(5.(3)において後述)．一方で，神城地区での強震動評価では，K-NET白馬(神城地区に最も近い既存強震観測点)での設定値(**表-3**参照)を採用した．

(2) 強震波形計算手法

本研究では，経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法[20),21)]を適用した．この方法では，まず

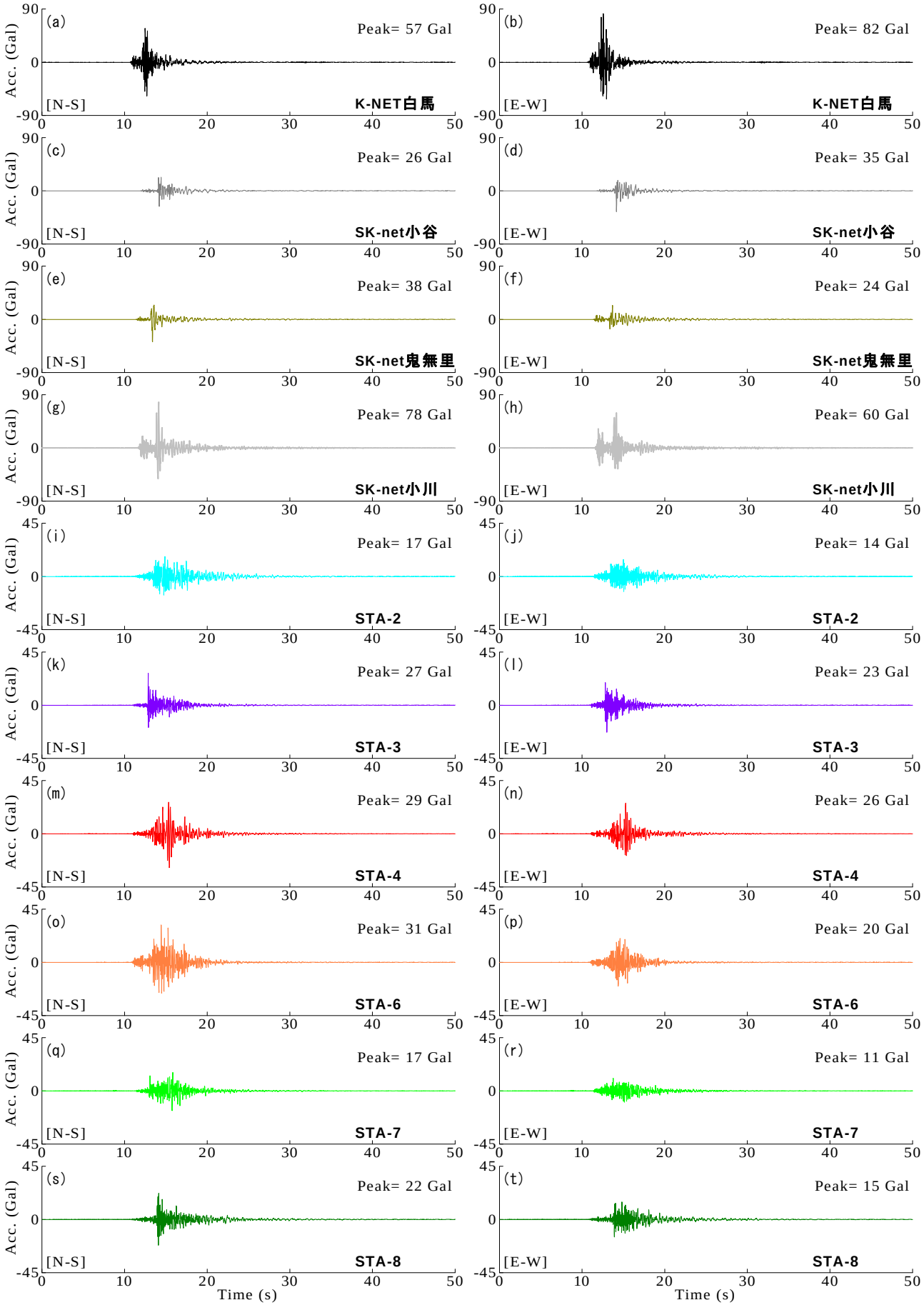

図-6　神城地区とその周辺の既存強震観測点で同時に得られた余震(EQ-5)による観測地震動(加速度波形の波形形状)の比較

表-2　特性化震源モデルのパラメータの一覧

断層パラメター	Asperity-1	Asperity-2	Asperity-3
走向 (deg.)	N22°E	N22°E	N22°E
傾斜 (deg.)	51	51	51
長さ (km)	4.5	3.0	2.0
幅 (km)	4.0	3.0	2.0
地震モーメント(Nm)	3.5×10^{17}	1.3×10^{18}	1.0×10^{18}
ライズタイム (sec)	0.3	0.3	0.2
破壊伝播速度 (km/s)	3.0	3.0	3.0

表-3　*PRTITN*の一覧

PRTITN	N-S Comp.	E-W Comp.
K-NET白馬 SK-net小谷	0.85	0.53
SK-net鬼無里	0.80	0.60
SK-net小川	0.71	0.71

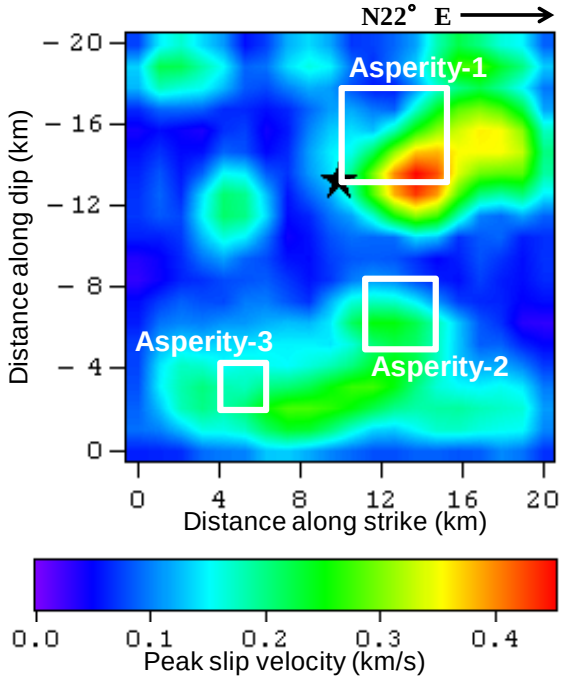

図-7　特性化震源モデル[7]の構築結果

式(1)により統計的グリーン関数を生成する．

$$A(f)=S(f)\cdot P(f)\cdot G(f)\cdot\frac{O(f)}{|O(f)|_p} \tag{1}$$

ここに，$A(f)$は地表における統計的グリーン関数のフーリエ変換で複素数，$S(f)$は中小地震の震源特性[14]で実数，$P(f)$は伝播経路特性[14]で実数，$G(f)$はサイト増幅特性(4.(1)参照)で実数，$O(f)$は対象地点での余震観測記録(図-5もしくは図-6参照)のフーリエ変換で複素数，$|O(f)|_p$はその絶対値に対してバンド幅0.05HzのParzen Windowを適用したものである．震源特性を計算する際，ラディエーション係数[19]としては，全方位への平均値である0.63を用いた．フーリエ位相特性($O(f)$, $|O(f)|_p$)の取り扱いについては，4.(2)で述べたとおり，震源断層内で発生した比較的規模の大きな余震として，EQ-1もしくはEQ-5(図-1および表-1参照)を採用した．

式(1)からわかるように，本手法では，統計的グリーン関数のフーリエ振幅は，震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として求め，統計的グリーン関数のフーリエ位相としては，現地で得られた余震記録(EQ-1もしくはEQ-5：図-1および表-1参照)のフーリエ位相を用いる．式(1)をフーリエ逆変換し，経験的グリーン関数法と同様の重ね合わせ[22]を行うことで，大地震による波形が求まる．なお，Parzen Window(添字pで表示)は，因果性を満足する地震波を生成する目的で用いられている[21]．

(3) 適用性の確認

図-8および図-9は，神城地区周辺の既存強震観測点において2014年長野県神城断層地震によって得られた速度波形(観測波)に対して(図-8と図-9において共通)，統計的グリーン関数のフーリエ位相としてEQ-1およびEQ-5を採用したケースにおける強震動推定結果(推定波)をそれぞれ比較したものである．さらに，図-10および図-11には，絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を観測波と推定波(いずれもフィルタ処理無の加速度波形)で比較したものを，統計的グリーン関数のフーリエ位相としてEQ-1およびEQ-5を採用したケースについて示す．

図-8，図-9，図-10，図-11に示すとおり，神城地区周辺の既存強震観測点において，推定波は比較的良好に観測波を再現できている．表-4は，各種地震動指標値(最大加速度*PGA*，最大速度*PGV*，速度PSI値[23]，SI値[24]，気象庁計測震度[11]，修正計測震度[25])を観測波と推定波で比較したものである．表-4に示すように，観測波と推定波の間には一定の再現性があることが確認でき，特に，観測波と推定波による気象庁計測震度・修正計測震度に関しては一致している．上記の観測波と推定波の類似性(図-8～図-11および表-4参照)は，フーリエ位相としてEQ-1を採用したケースならびにフーリエ位相としてEQ-5を採用したケースにおいてともに確認できる．

上述したように，評価したサイト増幅・位相特性(4.参照)，構築した特性化震源モデル(5.(1)参照)，経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法(5.(2)参照)の組み合わせは，神城地区周辺の既存強震観測点における地震動の再現に有効であることが確認できたので，同じ組み合わせを神城地区における地震動の推定にも適用する．

6.　神城地区における推定地震動の特徴

図-12は，2014年長野県神城断層地震による神城地区

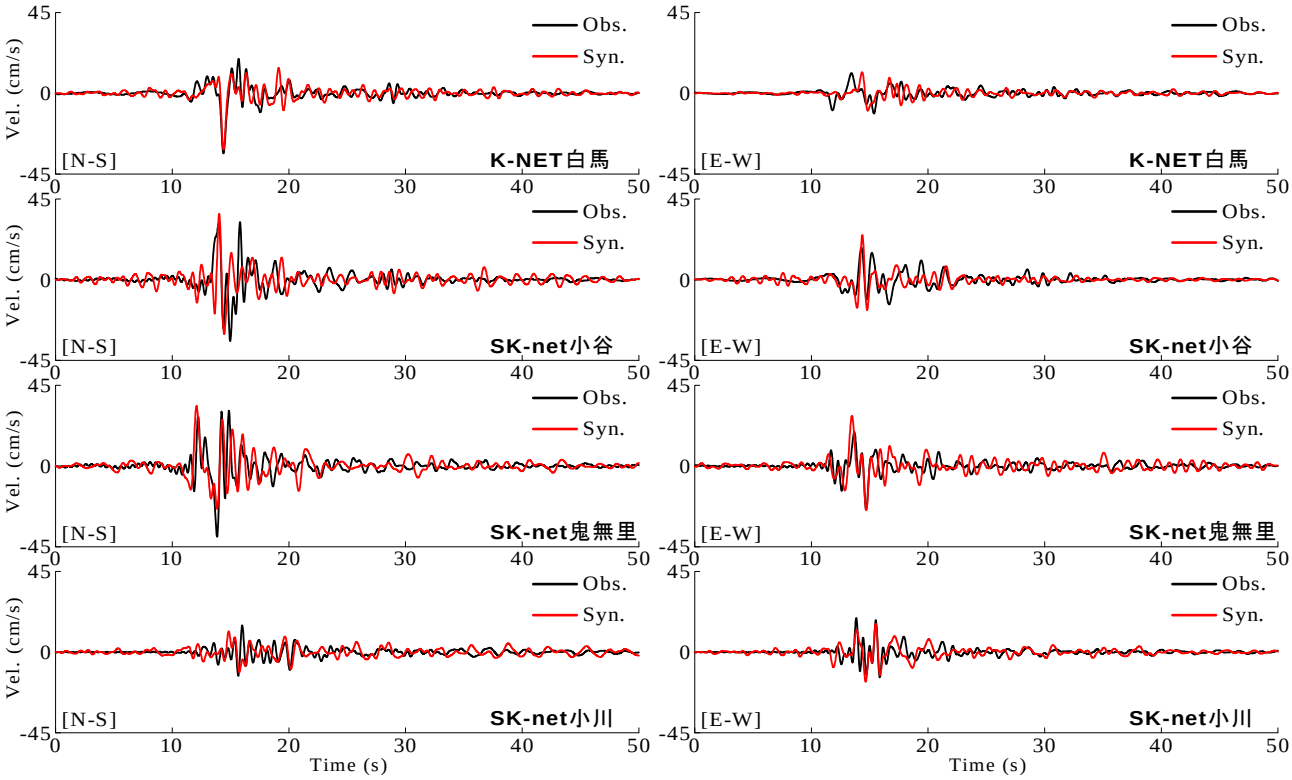

図-8　観測波と推定波の比較による地震動推定手法の適用性確認(速度波形：位相特性としてEQ-1を採用したケース)

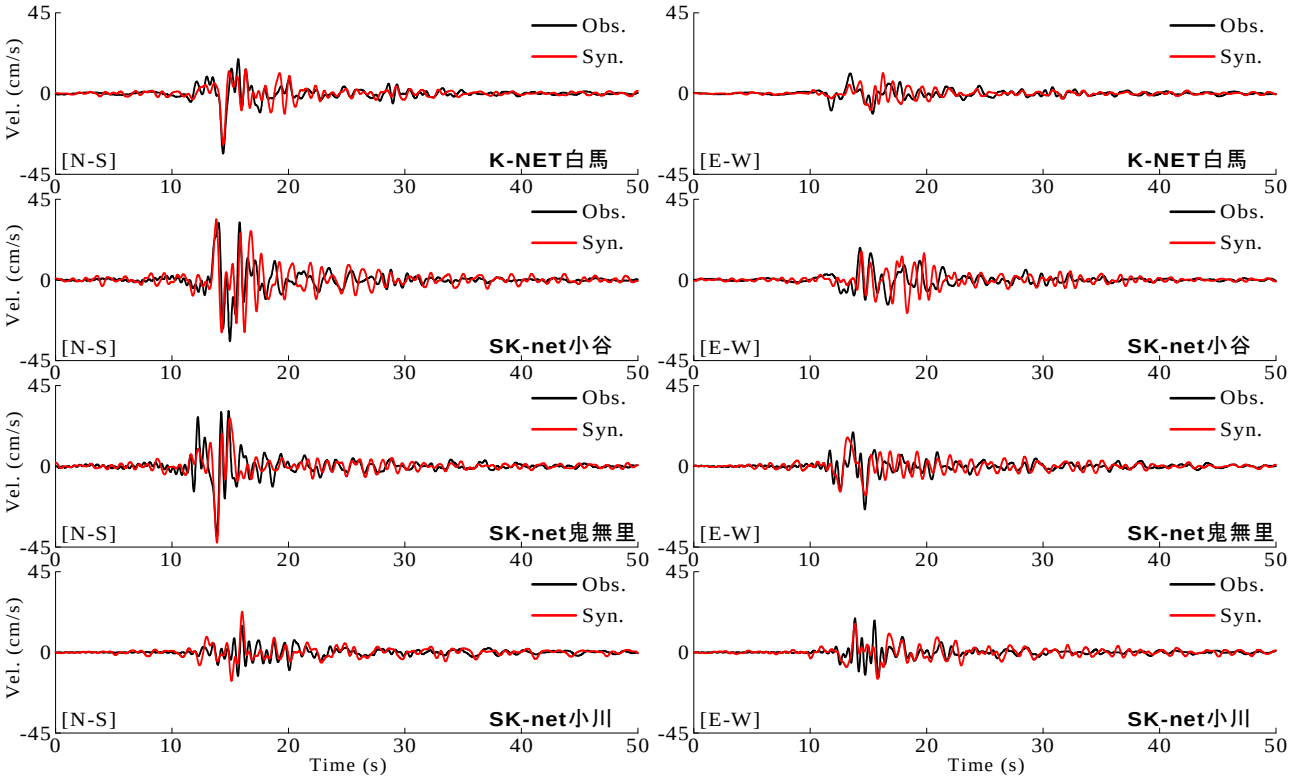

図-9　観測波と推定波の比較による地震動推定手法の適用性確認(速度波形：位相特性としてEQ-5を採用したケース)

(余震観測点位置相当：図-2参照)での推定地震動の速度波形(0.2－2Hz)である．図-12に示すとおり，神城地区内で住家の深刻な被害が報告[26]されているSTA-4(堀之内集落)・STA-5(田頭集落)・STA-6(三日市場集落)では，同地区内の他観測点(STA-1, 2, 3, 7, 8)と比較して，速度振幅が非常に大きな値を示す傾向にある．この傾向は，図-12および図-8・図-9に示すように，神城地区(被災集落内の臨時余震観測点)における推定地震動と既存強震観

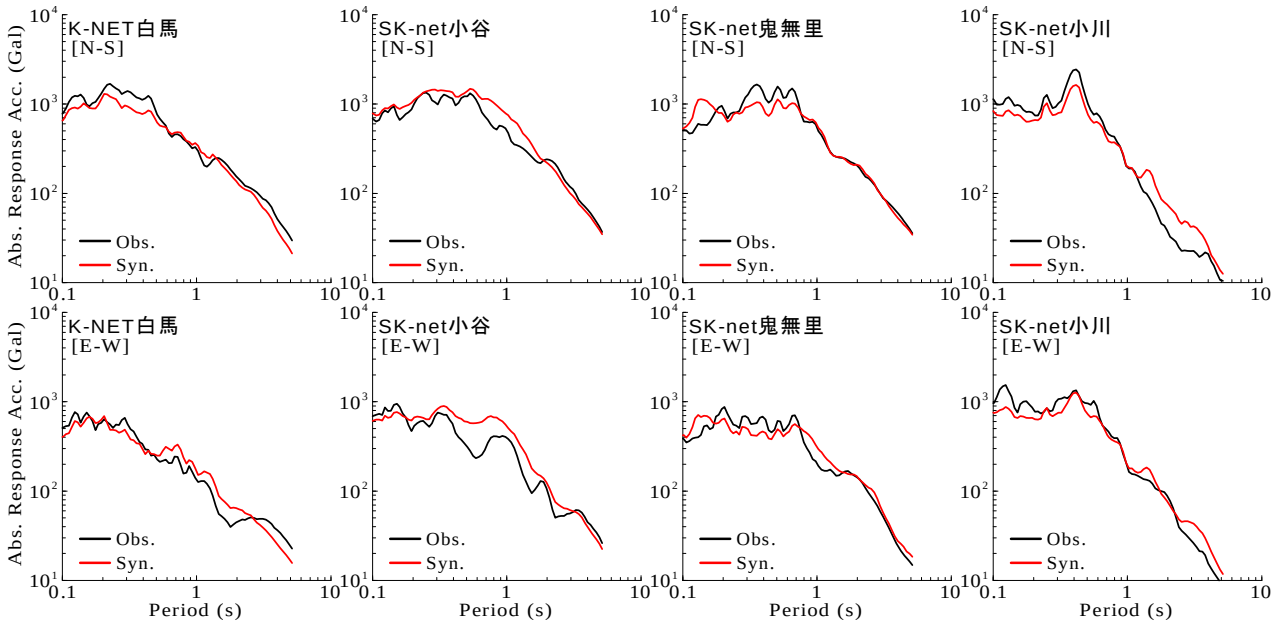

図-10　観測波と推定波の比較による地震動推定手法の適用性確認(応答スペクトル：位相特性としてEQ-1を採用したケース)

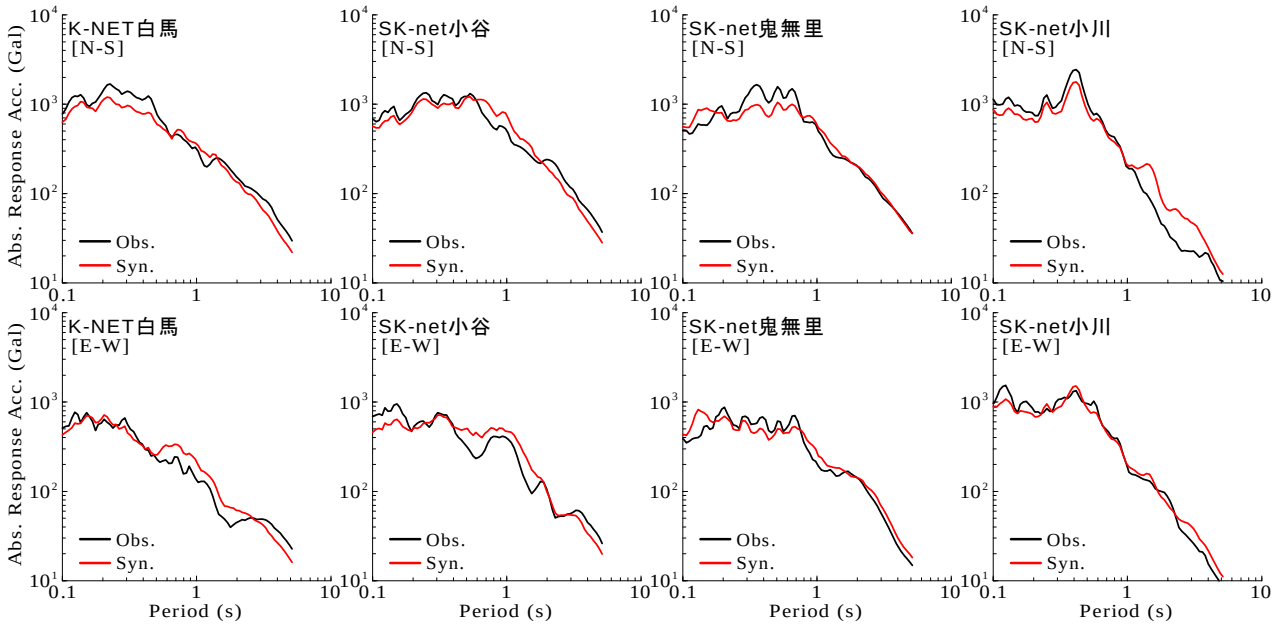

図-11　観測波と推定波の比較による地震動推定手法の適用性確認(応答スペクトル：位相特性としてEQ-5を採用したケース)

測点における観測地震動の比較においても顕著に表れている．すなわちこれらは，神城地区内の被災集落に作用した本震時の地震動は，神城地区周辺の既存強震観測点や同じ神城地区内の無被災集落などに作用した本震時の地震動よりも明らかに大きいこと，およびそれらの地震動の大小関係は被災・無被災の実績に対して矛盾していないこと，などを示唆するものである．

図-13は，2014年長野県神城断層地震によるK-NET白馬での観測地震動の絶対加速度応答スペクトルに対して，神城地区内における臨時余震観測点(STA-1～8)での推定地震動の絶対加速度応答スペクトルを重ね合せたものである．ここに，減衰定数はともに5%である．**図-13**に示すように，STA-4(堀之内集落)・STA-5(田頭集落)・STA-6(三日市場集落)の応答スペクトルは，対象周期帯全域(0.1－5s)において，同地区内における他観測点(STA-1, 2, 3, 7, 8)の応答スペクトルをほぼ包絡しており，被災・無被災実績に対して矛盾していないことが読み取れる．さらに，STA-4, 5, 6の応答スペクトルは，K-NET白馬(観測点周辺の住家等は無被災)の応答スペクトルと比較して，0.5sよりも長周期側で連続的に大きな加速度応答を示しており，先行研究による知見(住家等の被災に大きな影響を及ぼすのはやや短周期帯域の地震動成分である)に対して同様の結果が得られている．

表-5は，臨時余震観測点(STA-1～8)における推定地震

動の指標値(表-4と同種)の一覧である．表-5に示すように，被災集落(STA-4, 5, 6)の地震動指標値は，他観測点(STA-1, 2, 3, 7, 8)の地震動指標値に対して明らかに大きな値を示す傾向にあり，この傾向は地震動指標の種類

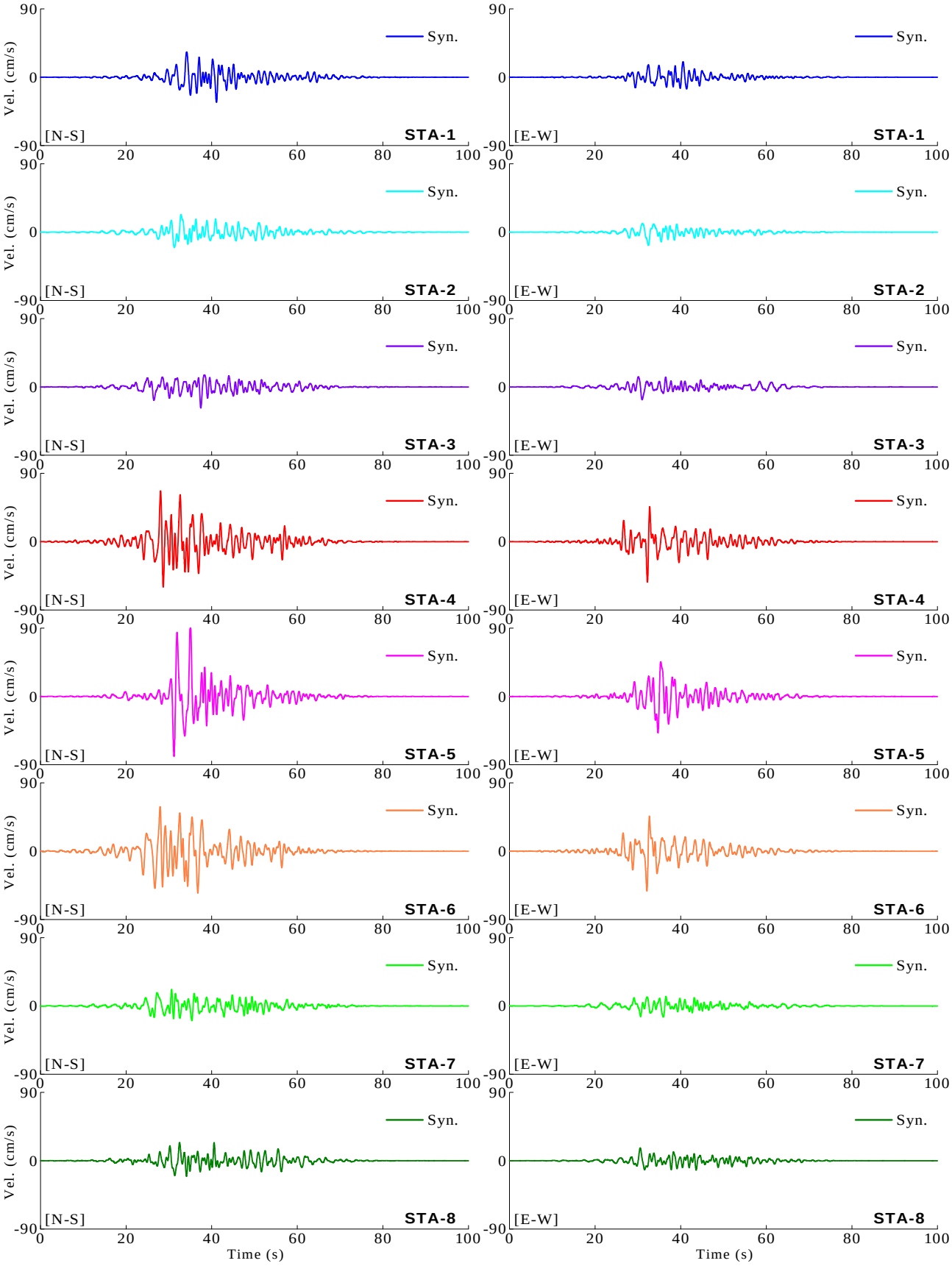

図-12　本震時に神城地区内の臨時観測点相当に作用した推定地震動の速度波形(0.2－2Hz)

表-4　観測波と推定波の比較による地震動推定手法の適用性確認（観測波と推定波による各種地震動指標値の一覧）

地震動指標		最大加速度PGA (Gal)		最大速度PGV (cm/s)		速度PSI値 (cm/s$^{1/2}$)		SI値 (cm/s)		気象庁 計測震度 [水平2成分]	境ほかによる 修正計測震度
	水平成分	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W		
K-NET白馬	観測波	570	219	61.0	16.5	31.4	17.7	41.8	16.0	5.3	5.1
	推定波（**EQ-1**）	489	185	52.5	15.6	28.2	19.4	35.9	18.4	5.3	5.1
	推定波（**EQ-5**）	438	257	52.5	17.1	28.1	17.6	38.6	19.6	5.3	5.1
SK-net小谷	観測波	460	264	40.3	22.1	40.0	24.3	51.4	27.7	5.5	5.2
	推定波（**EQ-1**）	627	364	69.9	38.3	43.4	28.1	69.2	41.4	5.5	5.3
	推定波（**EQ-5**）	479	247	43.8	24.7	42.7	28.0	54.1	38.7	5.5	5.3
SK-net鬼無里	観測波	407	318	45.3	25.7	40.9	23.9	59.6	26.6	5.6	5.3
	推定波（**EQ-1**）	365	265	40.5	31.2	39.9	27.1	49.0	30.1	5.6	5.3
	推定波（**EQ-5**）	394	267	45.4	26.5	39.7	26.7	57.0	26.1	5.6	5.3
SK-net小川	観測波	683	546	28.1	26.2	30.9	23.5	35.7	36.6	5.7	4.8
	推定波（**EQ-1**）	483	535	24.1	24.3	28.0	26.9	26.7	33.2	5.7	4.9
	推定波（**EQ-5**）	496	480	30.7	23.5	28.1	27.1	32.6	27.8	5.7	4.9

表-5　本震時に神城地区内の臨時観測点相当に作用した推定地震動の指標値の一覧

地震動指標		最大加速度PGA (Gal)		最大速度PGV (cm/s)		速度PSI値 (cm/s$^{1/2}$)		SI値 (cm/s)		気象庁 計測震度 [水平2成分]	境ほかによる 修正計測震度
	水平成分	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S	E-W		
STA-1	推定波(**EQ-1**)	277	173	33.6	20.4	55.4	34.4	39.6	24.8	5.3	5.7
STA-2	推定波(**EQ-5**)	310	214	26.2	18.9	44.3	27.4	24.8	18.0	5.1	5.2
STA-3	推定波(**EQ-5**)	288	185	28.7	18.1	44.4	28.1	30.0	17.6	5.1	5.4
STA-4	推定波(**EQ-5**)	652	428	77.8	53.7	108.7	65.7	86.5	61.3	6.1	6.3
STA-5	推定波(**EQ-1**)	734	359	97.1	50.3	124.5	75.7	100.5	54.5	6.2	6.4
STA-6	推定波(**EQ-5**)	567	418	62.2	52.1	113.7	68.7	79.9	56.2	6.1	6.2
STA-7	推定波(**EQ-5**)	375	153	21.1	14.8	45.3	28.5	28.2	19.4	5.2	5.4
STA-8	推定波(**EQ-5**)	276	150	25.1	17.6	46.8	29.4	28.3	17.9	5.1	5.3

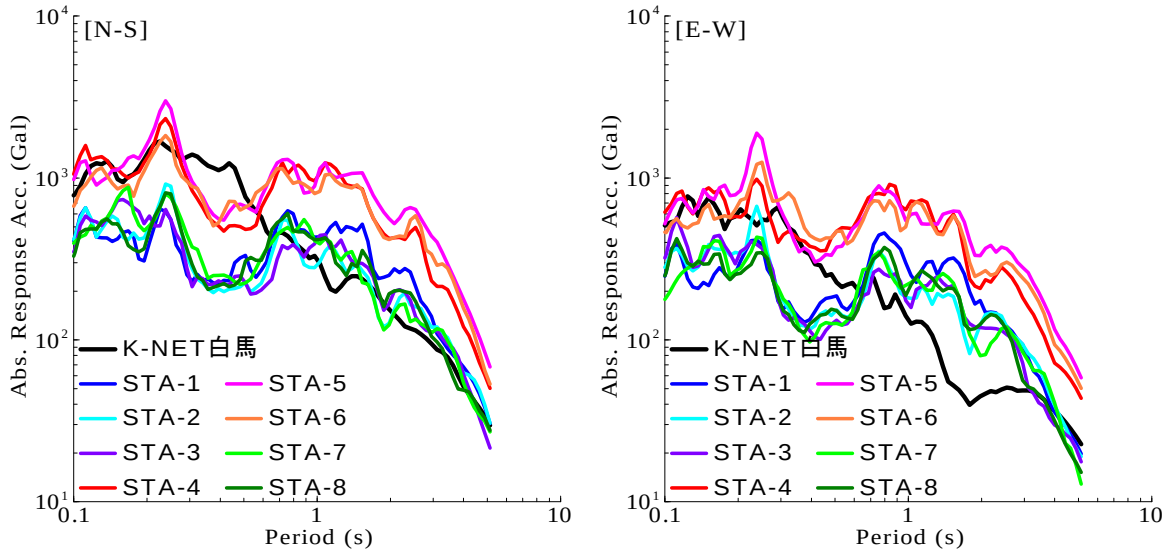

図-13　本震時に神城地区内の臨時観測点相当に作用した推定地震動の絶対加速度応答スペクトル（減衰定数5%）

に依存していない．さらに，**表-5**と**表-4**を比較すると，STA-4, 5, 6での推定地震動による指標値は，神城地区周辺の既存強震観測点での観測地震動による指標値をほぼ上回っている．

7. まとめ

本研究では，2014年長野県神城断層地震において白馬村神城地区に作用した強震波形を，現地で行った臨時余震観測によって得られた記録に基づいて広域にわたって評価した．得られた知見を以下に示す．

(1) 神城地区と周辺の既存強震観測点では，サイト特性が異なっているため，神城地区でのサイト増幅・位相特性を考慮して，2014年長野県神城断層地震時の地震動を推定する必要がある．

(2) 本研究で構築した特性化震源モデルと，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組み合わせを利用すれば，2014年長野県神城断層地震におけるK-NET白馬・SK-net小谷・SK-net鬼無里・SK-net小川で得られた強震波形を一定の精度で再現することが可能である．

(3) 神城地区内の推定地震動は，同じ地区内であるにも関わらず，被災・無被災集落において推定された地震動の特徴に有意な差異が確認でき，この差異は，被災・無被災実績に対して調和的である．

(4) 神城地区内の被災集落での推定地震動は，周辺の既存強震観測点で得られた観測地震動と比較して，速度振幅が非常に大きな値を示すだけでなく，やや短周期帯域において大きな加速度応答を示す．

今後は，推定地震動を入力波とした住家や段丘斜面の動的解析などを実施していきたいと考えている．

謝辞：国立研究開発法人防災科学技術研究所：K-NET, 長野県（東京大学地震研究所：SK-net）による地震観測波形データ，および気象庁の震源データを使用させていただきました．また，臨時余震観測の実施にあたっては，白馬村役場および現地住民の皆様に大変お世話になりました．科学研究費補助金・若手研究A「超高密度地震観測に基づく宅地造成斜面におけるダイナミック地すべり挙動の広域的評価（15H05532）」の一部を使用しました．ここに記して深く御礼申し上げます．

参考文献

1) 長野県災害対策本部室：長野県神城断層地震による県内の被害状況等，平成 26 年 11 月 24 日災害情報プレスリリース，2014.
2) 小長井一男，吉見雅行，秦吉弥，後藤浩之，池田隆明：2014 年長野県北部の地震 地震被害調査速報，土木学会誌，Vol.100, No.2, pp.8-11, 2015.
3) 例えば，野津厚，一井康二：性能設計の発展型としての Evidence-Based Design の提案とその実現に向けた課題，第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集，日本地震工学会，pp.3073-3080, 2010.
4) Hata, Y., Murata, A. and Miyajima, M.: Preliminary report on strong motion estimation at damaged and non-damaged clusters in Kamishiro District, Hakuba Village during a large earthquake (M_{JMA}=6.7) in northern Nagano Prefecture, central Japan, *Journal of JSCE Disaster Fact Sheets*, FS2015-E-0001, 2015. http://committees.jsce.or.jp/disaster/FS2015-E-0001
5) 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, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.101, No.2, pp. 688-700, 2011.
6) 秦吉弥，村田晶，野津厚，宮島昌克：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，日本地震工学会論文集，Vol.12, No.2, pp.60-77, 2012.
7) 秦吉弥，村田晶，野津厚，宮島昌克：2014 年長野県神城断層地震における特性化震源モデルの構築とその応用，土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集，I-223, pp.445-446, 2015.
8) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
9) 鷹野澄，纐纈一起，工藤一嘉，古村孝志，山中佳子，ト部卓，土井恵治：首都圏強震動総合ネットワーク SK-net，記念シンポジウム「日本の強震観測 50 年」―歴史と展望―講演集，防災科学技術研究所資料，No.264, pp.119-122, 2005.
10) 川瀬博：震源近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造物破壊能―1995 年兵庫県南部地震での震災帯の成因に学ぶ―，第 10 回日本地震工学シンポジウムパネルディスカッション資料集，pp.29-34, 1998.
11) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
12) 先名重樹，安達繁樹，安藤浩，荒木恒彦，飯澤清典，藤原広行：微動探査観測システムの開発，第 115 回物理探査学会学術講演会講演論文集，pp.227-229, 2006.
13) 秦吉弥，一井康二，常田賢一，柴尾享，山田雅行，満下淳二，小泉圭吾：アレー計測を利用した道路盛土の地震応答特性の評価，地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2010 論文集，地盤工学会，pp. 21-26, 2010.
14) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
15) 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，No.556, pp.15-24, 2002.
16) 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, pp.215-234, 2007.
17) （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，pp.336-341, 2007.
18) 澤田純男，盛川仁，土岐憲三，横山圭樹：地震動の位相スペクトルにおける伝播経路・サイト特性の分離，第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp. 915-920, 1998.
19) 野津厚：2014 年 11 月 22 日長野県北部の地震（M6.7）の震源モデル（暫定版）―デジタルデータ付き―，港湾空港技術研究所地震防災研究領域研究ノート，2015.
http://www.pari.go.jp/bsh/jbn-kzo/jbn-bsi/taisin/research_jpn/research_jpn_2015/jr_45.html
20) 古和田明，田居優，岩崎好規，入倉孝次郎：経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価，日本建築学会構造系論文集，No.512, pp.97-104, 1998.
21) 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, pp.808-813, 2009.
22) 入倉孝次郎，香川敬生，関口春子：経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良，日本地震学会秋季大会講演予稿集，No.2, B25, 1997.
23) 例えば，野津厚，井合進：岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察，第 28 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，pp.18-19, 2001.
24) Housner, G. W.: Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault. *Proc. of 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, pp.94-115, 1965.
25) 境有紀，纐纈一起，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.85-91, 2002.
26) 向坊恭介，佐藤英佑，鈴木祥之：木造建築物被害，日本地震工学会 2014 年長野県北部の地震に関する調査団報告，pp.72-86, 2015.

（2015. 9. 4 受付）

STRONG MOTION ESTIMATION WITH HIGH DENSITY IN KAMISHIRO DISTRICT, HAKUBA VILLAGE FOR THE 2014 NORTHERN NAGANO PREFECTURE EARTHQUAKE BASED ON OBTAINED AFTERSHOCK OBSERVATION RECORDS AND CHARACTERIZED ORIGINAL SOURCE MODEL

Yoshiya HATA, Akira MURATA, Atsushi NOZU, Koji HADA, Masayuki YAMADA
Masakatsu MIYAJIMA, Akira FUJIKI and Ken-ichi TOKIDA

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 2014 Northern Nagano Earthquake. However, there were no strong motion observation stations at the wooden house damage sites during this earthquake. In this study, the seismic waveforms at Kamishiro District, where a lot of wooden house damage occurred, were estimated with high density based on empirical site amplification and phase effects. The estimated seismic waveforms will be useful for rational safety assessment of wooden houses.