

常時微動計測および臨時地震観測に基づく 2016年熊本地震の本震における 益城町小谷集落での地震動の評価

秦 吉弥¹・村田 晶²・湊 文博³・渋谷 研一⁴・宮島 昌克⁵

¹正会員 大阪大学 准教授 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 助教 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学生会員 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: fminato@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁴正会員 朝日航洋株式会社 防災コンサルタント部 (〒350-1165 埼玉県川越市南台3-1-1)

E-mail: kenichi-shibuya@aeroasahi.co.jp

⁵正会員 金沢大学 教授 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

益城町役場と西原村役場のほぼ中間付近に位置する益城町小谷集落では、2016年熊本地震の本震による強震動の作用により、住家の損壊などの深刻な被害が発生した。本稿では、小谷集落において高密度常時微動計測および臨時地震観測を実施し、得られた計測・観測記録に基づいてサイト増幅・位相特性を評価した。そして、特性化震源モデルに基づいた強震波形計算を実施し、本震時に小谷集落に作用した地震動を推定した。その際、小谷集落周辺の既存強震観測点であるKiK-net益城および菊陽町役場で得られた本震記録を一定の精度で再現することで、地震動推定手法の適用性を確認した。

Key Words : strong motion, microtremor measurement, seismic observation, wooden house damage

1. はじめに

今日、我が国では、(国研)防災科学技術研究所K-NET/KiK-net¹⁾、気象庁²⁾、国土交通省³⁾、地方自治体⁴⁾などによって、非常に密な強震観測ネットワークが整備されている。それにより、近年発生した大規模地震では、近傍の強震観測点で得られた記録においても地震動特性に有意な差異が見受けられる⁵⁾ことが明らかにされている。すなわち、強震動の作用によって住家等の倒壊を伴う深刻な被害が発生した地域において、その被害原因となった大規模地震時に当該地域において地震観測が既に行われていることは極めて稀であり、周辺で得られた観測地震動を当該地域に作用した地震動と見なすことができないケースが非常に多いのが現状⁶⁾である。これまでの被害原因の究明においては、周辺で得られた観測地震動に基づいて大規模地震時に当該地域に作用した強震動を推定する試み^{7,8)}が行われている。

2016年熊本地震の強震動の作用による住家等の倒壊を

伴う人的被害は、益城町役場周辺において集中的に発生している。この点に関して秦ほか^{9,10)}は、4月14日21時26分に発生した熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード6.5の地震(以後、前震と呼ぶ)による被災状況を踏まえ、4月15日の日中から臨時地震観測を開始し、益城町役場周辺の被災地において、4月16日1時25分に発生した熊本県熊本地方を震源とする気象庁マグニチュード7.3の地震(以後、本震と呼ぶ)による強震動を観測することに成功している。一方で、秦ほか^{11,12)}は、益城町役場周辺において臨時の余震観測を広域かつ高密度に実施し、得られた観測記録に基づきサイト増幅特性を評価している。また秦ほか^{13,14)}は、益城町役場周辺において常時微動計測を広域かつ高密度に実施し、得られた計測記録に基づき地盤震動特性を評価している。さらに、秦ほか¹⁵⁾は、上記^{11,14)}で得られた知見と特性化震源モデルに基づいて本震時に益城町役場周辺の造成宅地に作用した強震動を広域かつ高密度に推定している。

上述した先行研究⁹⁻¹⁵⁾では、いずれも益城町役場周辺

の造成宅地を対象フィールドとしているが、益城町役場周辺以外の地域においても住家等の深刻な被害が多数発生されている。例えば、益城町小谷集落は、益城町役場と西原村役場の中間付近に位置しており(図-1参照)、本震による強震動の作用に主に起因した木造住宅の被害が報告^{16,17)}されている。この点に関して、村田ほか¹⁷⁾は、小谷集落において単点微動計測を行い、工学的基盤以浅の表層地盤に着目した震動特性について考察している。

本稿では、上述した背景を踏まえ、本震時に小谷集落に作用した地震動を推定した結果について報告する。具体的には、まず、小谷集落内において常時微動計測を高密度に実施した。次に、常時微動計測により得られた知見を踏まえ小谷集落内に臨時設置した地震観測点において得られた記録に基づいてサイト特性を評価した。最後に、評価したサイト特性と特性化震源モデルの組合せに基づいて小谷集落における本震時の地震動を推定した。

2. 益城町小谷集落の特徴

図-2は、小谷集落周辺の既存強震観測点で得られた前震観測記録および本震観測記録を位置情報とともに示し

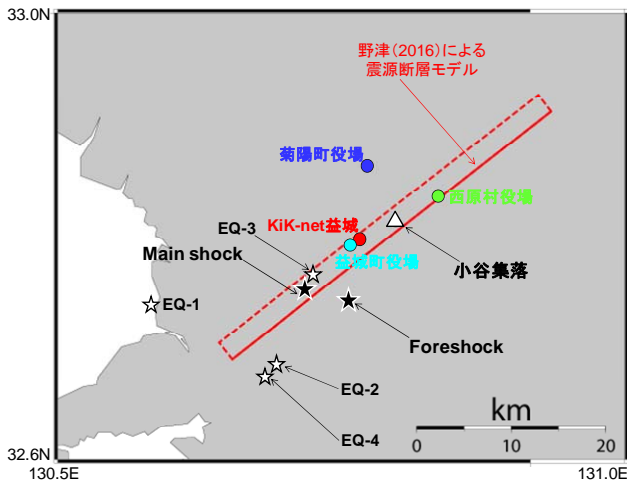


図-1 前震・本震の震央と小谷集落の位置関係

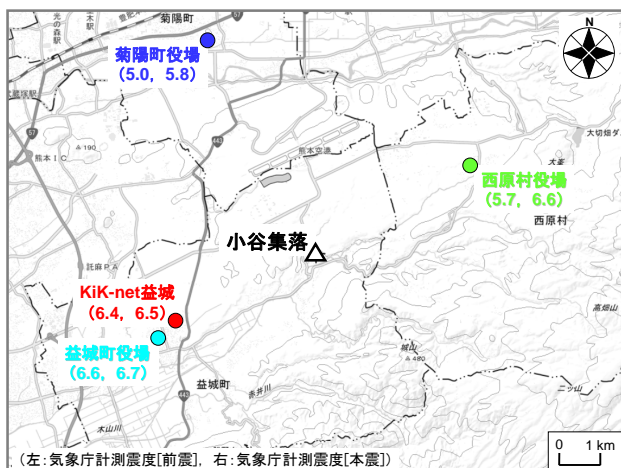


図-2 小谷集落周辺で得られた前震と本震の気象庁計測震度

たものである。図-2に示すように、近接する二地点間(益城町役場とKik-net益城)において前震時および本震時に記録された気象庁計測震度²⁾の値に有意な差異が確認できる。上記の二地点間距離に対して、小谷地区と周辺の観測点間の距離は非常に長いことから、既存強震観測点で得られた前震観測記録および本震観測記録を、前震時・本震時に小谷地区に作用した地震動と見なすことが困難であることが示唆される。

図-3および図-4は、小谷集落周辺の地形図¹⁸⁾と、その図郭に対応した前震直後・本震直前の2016年4月15日に撮影された上空写真である。図-3および図-4に示すように、小谷集落は、南方以外を山地で囲まれた谷地形沿いに位置しており、前震の強震動の作用により一部の住家の屋根がブルーシートで覆われているのが確認できる。なお、図-4において一見すると、住家の屋根がブルーシートで覆われている箇所は一般的な分布ではなく特定の箇所(山際)に集中しているように思えるが、前震直後の4月15日に著者らによって行われた現地踏査では、山際の住家に被害が必ずしも集中していなかったことを確認している。

図-5に(国研)産業技術総合研究所による地質図¹⁹⁾、図-6・図-7・図-8に国土交通省国土政策局による表層地質

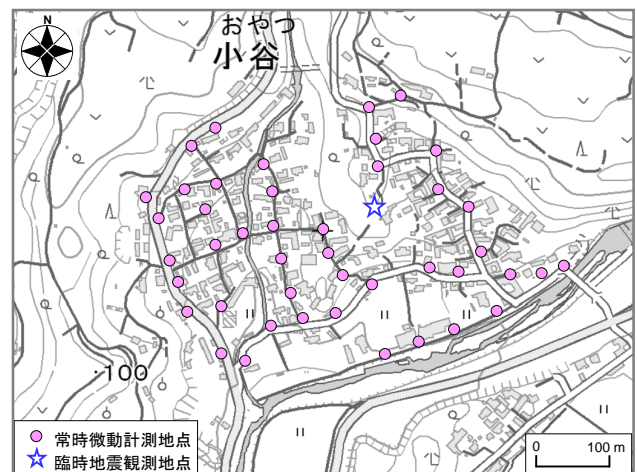


図-3 小谷集落における常時微動計測点の分布



図-4 小谷集落の上空写真(2016/04/15 朝日航洋(株)協力撮影)

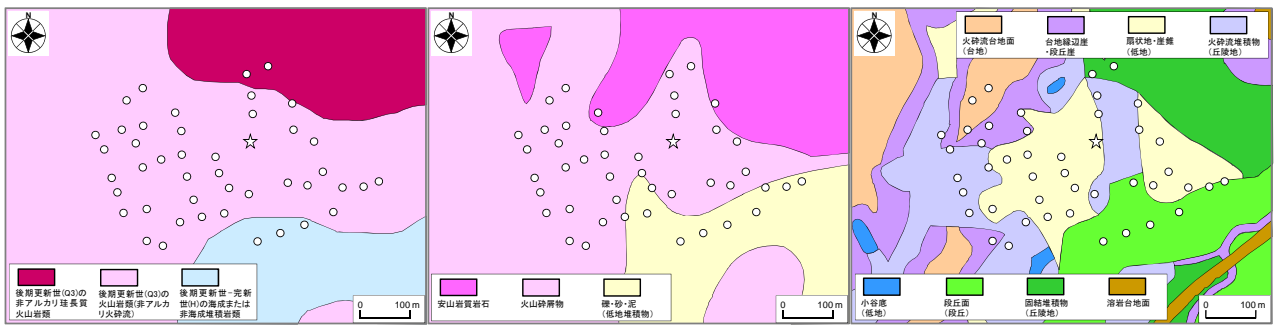


図-5 産総研による地質図¹⁹⁾

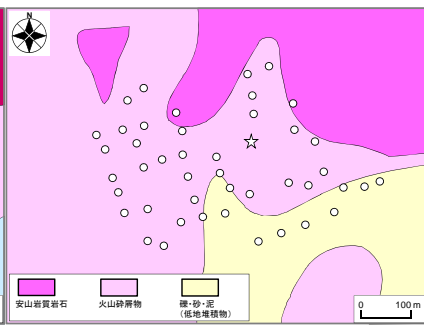


図-6 国交省による表層地質図²⁰⁾

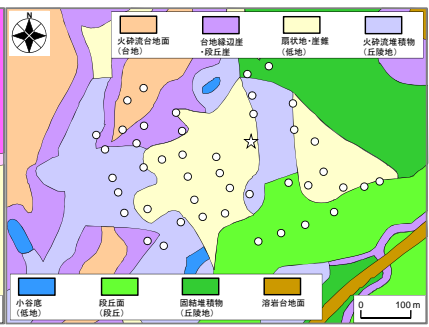


図-7 国交省による地形分類図²¹⁾

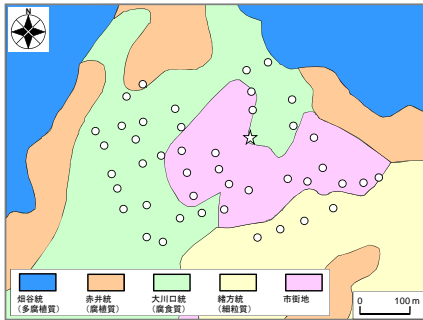


図-8 国交省による土壌図²⁰⁾

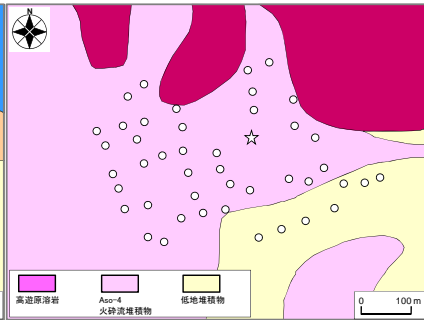


図-9 熊本市周辺地盤図²¹⁾

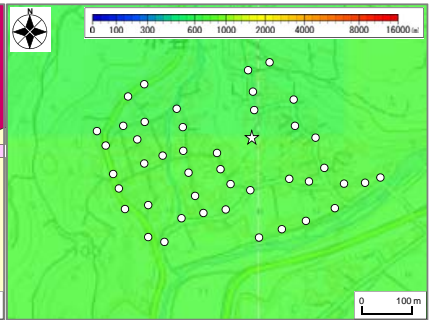


図-10 J-SHISによる地震基盤の深度分布²²⁾

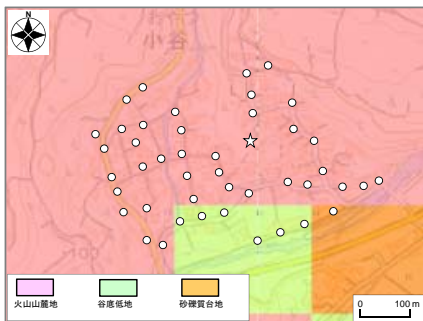


図-11 J-SHISによる微地形区分²²⁾

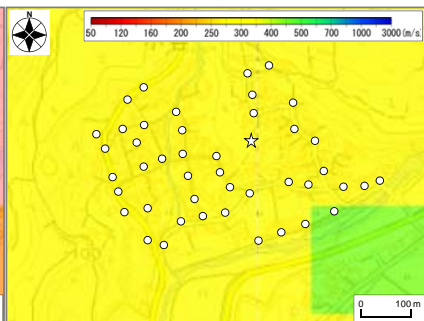


図-12 J-SHISによるAVS30の分布²²⁾

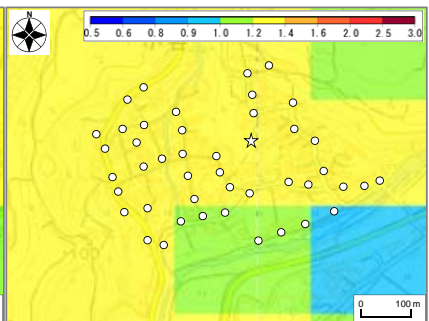


図-13 J-SHISによる表層地盤の増幅率²²⁾

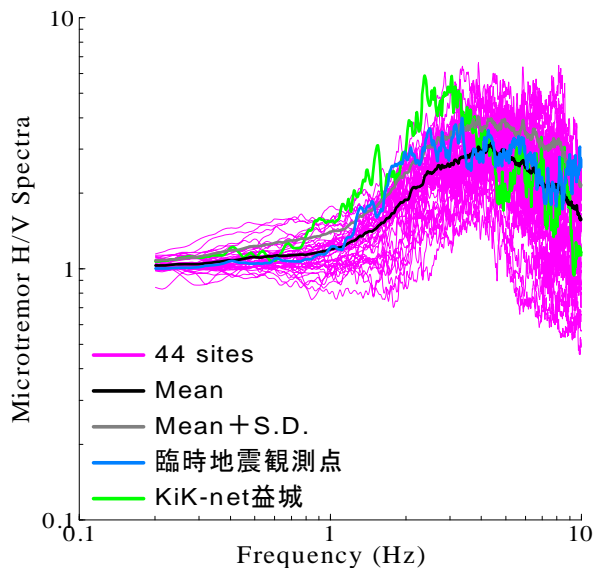


図-14 常時微動H/Vスペクトルの比較



写真-1 常時微動計測の実施状況例

図・地形分類図・土壌図²⁰⁾、図-9に(一社)熊本県地質調査業協会による熊本市周辺地盤図²¹⁾を、図-3の図郭に合わせて示す。さらに、図-10、図-11、図-12、図-13に防災科研J-SHIS²²⁾に基づく地震基盤の深度分布、微地形区

分、30m平均S波速度(AVS30)²³⁾の分布、表層地盤による増幅率の分布を、図-3の図郭に合わせて示す。図-5～図-13に示すように、各々の図において着目する指標・区分によって、小谷集落内における傾向が概ね一様であるケースとそうでないケースが混在しており、小谷集落内における地盤震動特性を概ね一様であると見なせるのか、もしくは小谷集落内を複数の区域等にゾーニングする必要があるのか、などについて詳細に評価する必要性が示

唆される。なお、図-5～図-13では、対象としている地盤深度がまちまちであったり、出典の異なる地質図が併記されているが、これらは、本稿で対象としている地盤震動特性(サイト増幅特性など)が地震基盤～工学的基盤～地表にまで及んでいるためであり、特定の深さの地盤特性や地質状況に着目しているわけではない。

3. 高密度常時微動計測の実施

常時微動計測は、図-3に示すように、小谷集落の全域(一般に立ち入りが可能な区域)の45地点において実施した。写真-1に常時微動計測状況の一例を示す。計測期間は、2016年7月28日である。計測は主に昼間に実施し、同型の七台の微動計(七台ともに白山工業(株)製の一体型微動探査兼地震計機器²⁴⁾)を採用した。計測機器の諸元については、文献24)を参照されたい。計測方向は水平二成分と鉛直成分の計三成分であり、後述する常時微動H/Vスペクトルの計算では、水平二成分の平均をとった。計測時間は、一計測点あたり約30分間の単点計測とした。常時微動H/Vスペクトルの計算処理方法²⁵⁾としては、まず、微動の加速度時刻歴に対して0.1Hzのハイ・パスフィルターを施し、雑振動が比較的小さい163.84秒の区間を七区間抽出し、フーリエスペクトルの計算を行い、バンド幅0.05HzのParzen Windowで平滑化した後に、H/Vスペクトルを算出し、七区間の平均をとった。評価振動数の範囲としては、使用した微動計測器の性能²⁴⁾などを考慮して0.2～10Hzとした。

図-14は、小谷集落内に設けた臨時地震観測点(4.で後述)における常時微動H/Vスペクトルと、小谷集落全体(44地点)の常時微動H/Vスペクトルを重ね合せたものである。図-14に示すとおり、同じ小谷集落内において

も、ピーク周波数やスペクトル形状などの常時微動H/Vスペクトルの一般的特徴に一定のバラツキが確認できる。一方で、小谷集落全体のH/Vスペクトル(周波数ごとの平均値およびその標準偏差の分布)に対する臨時地震観測点でのH/Vスペクトルの比較において、両者の特徴(ピーク周波数やスペクトル形状など)が良い一致を示している。すなわちこれは、臨時地震観測点における地盤震動特性が小谷集落全体の地盤震動特性として代表できる可能性が高いことを示唆するものである。

図-14には、KiK-net 益城における常時微動H/Vスペクトル^{12),13)}も同時に示しており、臨時地震観測点におけるH/Vスペクトルに対して比較的類似しているものの、0.8～4Hzの周波数帯域において類似度が低下しているのが読み取れる。よって、前震時・本震時に小谷集落に作用した地震動としてKiK-net 益城(最も近い観測点)で得られた記録が転用できるか否かについては、より詳細な検討が必要であることが示唆される。なお、H/Vスペクトルのばらつきそのものが小谷集落内における地盤震動特性の相違を反映しているものと推察できるが、比較的狭い同集落内における住家被害(前震直後の4月15日ならびに本震後の常時微動計測時の7月28日にそれぞれ踏査した住家被害)の分布状況に対して結果的に良い相関が得られなかったことを確認している。

4. 臨時余震観測の実施

小谷集落のほぼ中央付近に設けた臨時地震観測点の位置を図-3に示す。地震観測は、一体型微動探査兼地震計機器²⁴⁾を上記位置の地表に設置することで実施した。観測期間は、2016年5月14日～15日である。観測条件として、サンプリング周波数は100Hz、および観測方向はNS、

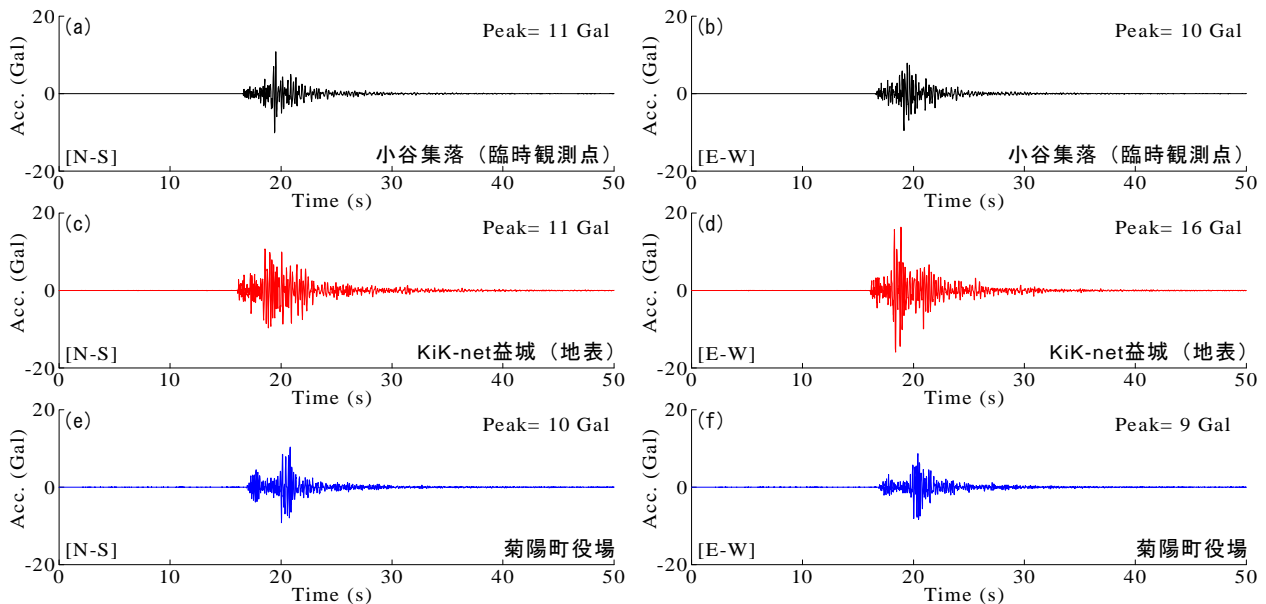


図-15 前震・本震の震源近傍で発生した中小地震(EQ-3)による観測地震動の加速度時刻歴の比較

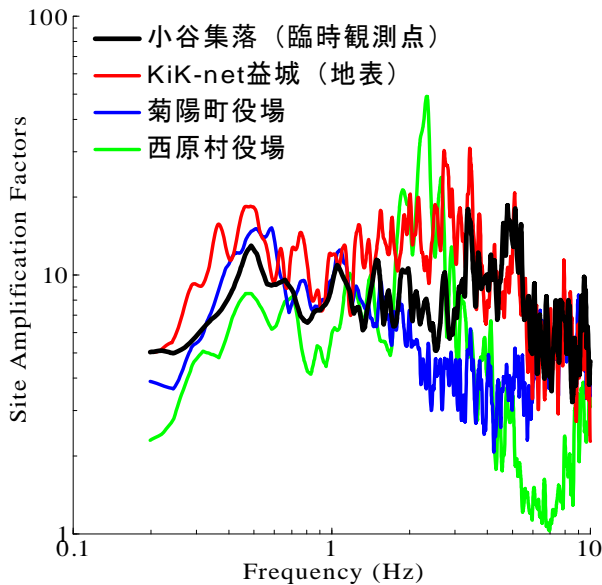


図-16 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

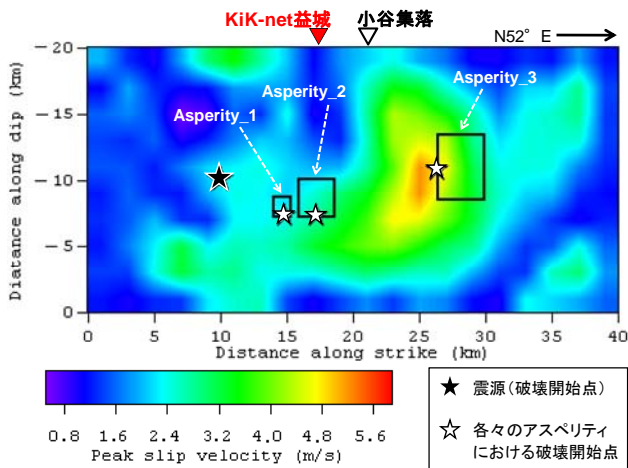


図-17 野津による特性化震源モデル(文献31)に一部加筆)

EW, UDの3成分とし、トリガー加速度レベルは設定せず、常時観測を継続するシステムとした。なお、本稿では、上記と同様の地震観測システムを菊陽町役場の震度計の極近傍においても設置した。これは、地方自治体(ここでは熊本県震度情報ネットワークシステム)で得られた観測地震動のデータが公開されるのは、その規模が比較的大きい場合に限られているため⁴⁾である。その結果、以下に示すような余震観測記録がKiK-net益城(既存観測点)と同時に得ることができた。

- ・EQ-1: 2016/05/14 18:45 11km 熊本県熊本地方(M_j 4.0)
- ・EQ-2: 2016/05/14 22:46 14km 熊本県熊本地方(M_j 3.6)
- ・EQ-3: 2016/05/15 06:36 14km 熊本県熊本地方(M_j 3.6)
- ・EQ-4: 2016/05/15 18:09 14km 熊本県熊本地方(M_j 3.9)

上記EQ-1～4のうち、図-1に示すとおり、EQ-3は前震・本震の震源近傍で発生した中小地震(余震)であることから、前震時・本震時に小谷集落に作用した地震動を推定する際に、サイト位相特性として活用できる可能性が高い。図-15は、EQ-3によって小谷集落、KiK-net益城、菊陽町役場で同時に観測された地震動の加速度時刻

表-1 特性化震源モデルのパラメータの一覧

	Asperity_1	Asperity_2	Asperity_3
破壊開始時刻(h:m:s)	01:25:05.4	01:25:06.3	01:25:13.9
地震モーメント(Nm)	0.10×10^{18}	0.25×10^{18}	2.50×10^{18}
長さ(km)	1.5	3.0	4.0
幅(km)	1.5	3.0	5.0
走向(deg.)	232	232	232
傾斜(deg.)	84	84	84
ライズタイム(s)	0.13	0.27	1.00

表-2 設定したPRTITNおよび非線形パラメータの一覧

	PRTITN	ν_1	ν_2
KiK-net益城(N-S)	0.44	1.00	0.01
KiK-net益城(E-W)	0.90	1.00	0.01
菊陽町役場(N-S)	0.44	1.00	0.01
菊陽町役場(E-W)	0.90	1.00	0.01

歴を比較したものである。図-15に示すとおり、当該三地点における観測地震動の波形形状(すなわち、サイト位相特性)に有意な差異が見られることが確認できる。

図-16は、小谷集落におけるサイト増幅特性、KiK-net益城におけるサイト増幅特性²⁰⁾、菊陽町役場におけるサイト増幅特性²⁷⁾、西原村役場におけるサイト増幅特性²⁷⁾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。小谷集落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、KiK-net益城と臨時観測点で同時に得られた地震観測記録(EQ-1～4)を対象に、両地点の震源からの距離の違いによる補正²⁸⁾²⁹⁾を考慮したフーリエスペクトルの比率(臨時観測点/KiK-net益城)を計算した。次に、この比率をKiK-net益城における既存のサイト増幅特性²¹⁾に掛け合わせることにによって、小谷集落(臨時観測点)におけるサイト増幅特性を評価³⁰⁾した。

図-16に示すように、小谷集落とその周辺の菊陽町役場および西原村役場では、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、菊陽町役場もしくは西原村役場で得られた前震記録や本震記録を、前震時もしくは本震時に小谷集落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-16に示すとおり、小谷集落とKiK-net益城の比較では、サイト増幅特性の特徴が概ね類似しているものの、小谷集落は0.8～3Hzの周波数帯域でKiK-net益城を連続的に下回っていることが読み取れる。

小谷集落とKiK-net益城におけるサイト特性の比較において、サイト増幅特性の差異(図-16参照)ならびにサイト位相特性の差異(図-15参照)を踏まえれば、KiK-net益城で得られた前震観測記録および本震観測記録を、前震時もしくは本震時に小谷集落に作用した地震動として転用するのが困難であるといえる。

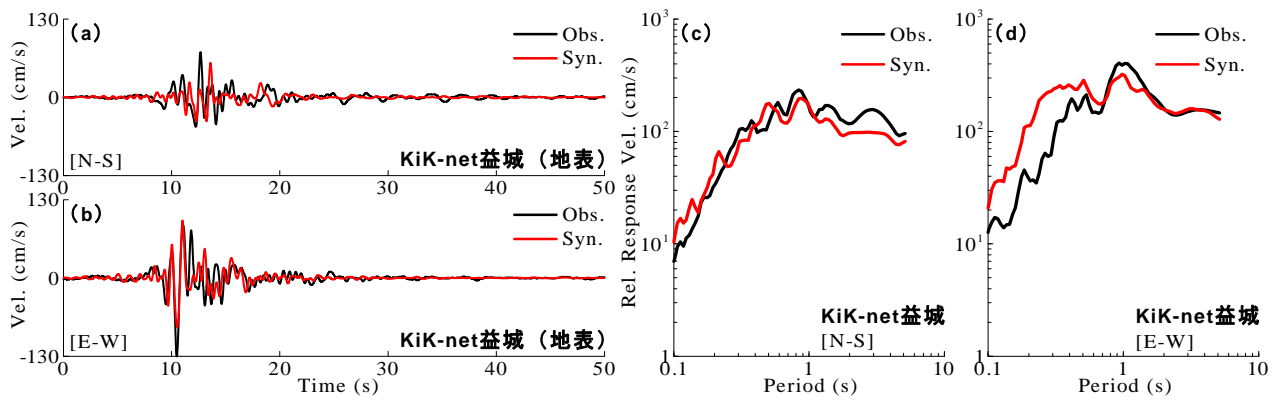


図-18 地震動推定手法の適用性確認(KiK-net益城での速度波形(0.2—2Hz)および相対速度応答スペクトル(減衰定数5%)の比較)

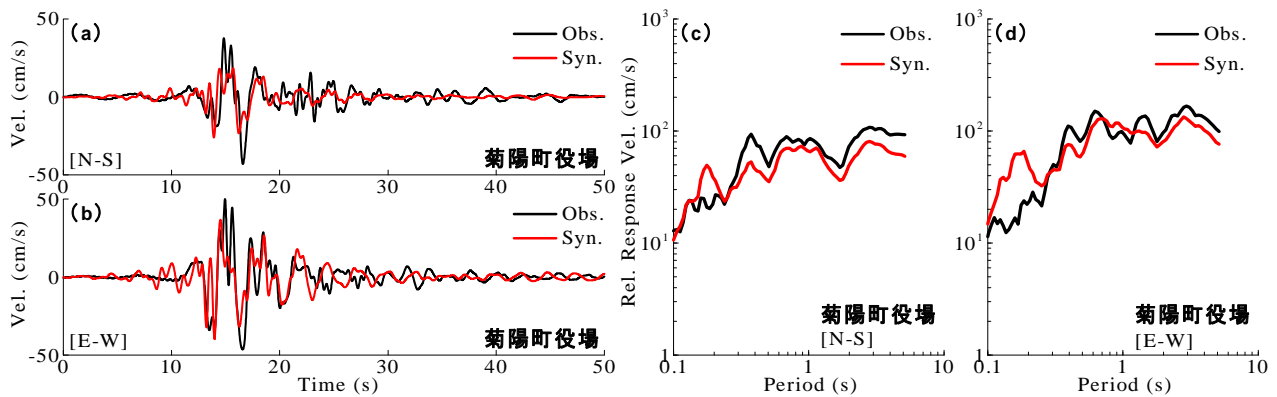


図-19 地震動推定手法の適用性確認(菊陽町役場での速度波形(0.2—2Hz)および相対速度応答スペクトル(減衰定数5%)の比較)

5. 地震動の評価

(1) 特性化震源モデル

2016年熊本地震の本震による地震動の推定には野津³¹⁾による特性化震源モデル(図-1参照)を採用した。図-17に断層モデル内におけるアスペリティおよび破壊開始点の分布、表-1にモデルパラメータの一覧をそれぞれ示す。この震源モデルは、主に震源域のK-NET/KiK-net観測点(KiK-net益城など)で得られた本震観測記録を一定の精度で評価可能なモデルである。ただし、強震波形計算を行う際のサイト位相特性として、本震直前の中小地震もしくは本震直後の余震による記録を採用³¹⁾しているが、小谷集落では、これらの地震による記録は得られておらず(4参照)、サイト位相特性としてEQ-3を採用した場合の適用性については必ずしも確認されていない。

上記の課題を踏まえて、本研究において追加検討を行った結果を5.(3)で詳述する。また、この震源モデルでは、気象庁による破壊開始点を含む断層面を仮定し、破壊伝播速度を2.8km/sとしている。また、基盤のS波速度は3.5 km/s、密度は2.7t/m³とし、Q値については加藤による鹿児島県・熊本県を対象とした内陸地殻内地震による推定値²⁹⁾を採用している。

(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³²⁾を適用した。この方法では、まず式(1)により統計的グリーン関数を生成する。

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

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、 $S(f)$ は小地震の震源スペクトルで実数、 $P(f)$ は伝播経路特性²⁸⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性(図-16参照)で実数、 $O(f)$ はEQ-3(図-1参照)による小谷集落などでの記録(図-15参照)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²⁸⁾としては、全方位への平均値である0.63を用いた。また、地震動エネルギーの水平二成分への分散を表す係数 $PRITIN$ ²⁸⁾は、表-2に示す一覧(N-SおよびE-W成分の二乗和は1となるという制約条件の下で、小谷集落周辺で観測された本震記録に最も適合する値をアスペリティ毎に設定したもの)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も得られた余震記録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³³⁾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

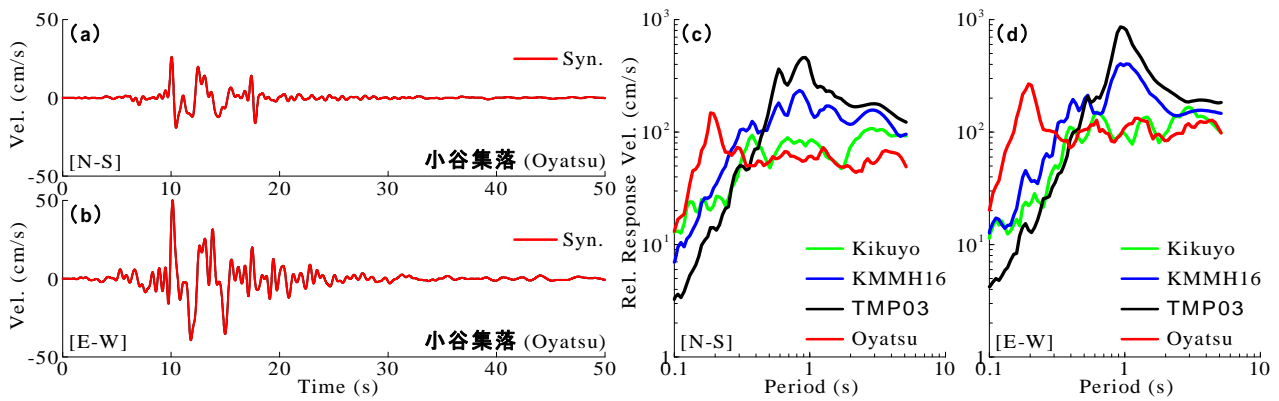


図-20 本震時における小谷集落での推定地震動(速度波形(0.2—2Hz)および相対速度応答スペクトル(減衰定数5%))

性を満足する地震波を生成する目的で用いられている³²⁾。

一方で、小谷集落周辺では、少なからず本震時に地盤の非線形応答が生じていたと考えられるため、表層地盤の非線形応答の効果を考慮してグリーン関数を補正する方法³³⁾を用いて波形合成を行った。具体的には、表-2に示す一覧(小谷集落周辺で得られた本震観測記録に最も適合する値)を採用した。表-2に示すとおり、 v_1 は堆積層における平均的なS波速度の低下率を表すパラメータ、 v_2 は堆積層における平均的な減衰定数の増分を表すパラメータであり、非線形性の影響が大きいほど v_1 は低下し、 v_2 は増加することになる。ここに、結果の解釈によってはほとんど地盤の非線形がないようにも見受けられるものの(表-2参照)、これは、工学的基盤～地表だけでなくさらに深部にあたる地震基盤～地表の地盤全体での非線形特性を表しているためである。

(3) 適用性の確認

図-18(a),(b)および図-19(a),(b)にKiK-net益城および菊陽町役場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)をそれぞれ比較したものを示す。なお両波形は、住家などの建造物の地震被害に結びつきやすいと考えられるやや短周期帯域³⁴⁾や造成宅地の被災に比較的大きな影響を及ぼす周波数帯域³⁵⁾などを考慮して、0.2—2Hzのバンドパス・フィルタを施した速度波形である。図-18(a),(b)および図-19(a),(b)に示すとおり、推定波は速度パルスの振幅や周期などの点で、観測波を比較的良好に再現するものとなっている。

図-18(c),(d)および図-19(c),(d)は、KiK-net益城および菊陽町役場での観測波と推定波による相対速度応答スペクトル(いずれも減衰定数5%)を比較したものである。図-18(c),(d)および図-19(c),(d)に示すように、着目する周期帯域によって過大もしくは過小に評価しているものの、観測波と推定波による相対速度応答スペクトルが比較的良好一致を示している。よって、小谷集落周辺のKiK-net益城および菊陽町役場における速度波形・相対速度応答スペクトルの再現性を踏まえると(図-17および図-18参照)、2016年熊本地震の本震による特性化震源モデ

ル³³⁾を用い、非線形パラメータ³⁴⁾を適切に設定して強震波形計算³⁵⁾を行えば、本震時に小谷集落に作用した地震動を適切かつ一定の精度で推定できるものと考えられる。

(4) 小谷集落における推定地震動

本稿では、5.(1)および5.(2)で述べた方法により、本震時における小谷集落での地震動を推定した。その際、地震動評価の際に必要な位置情報(緯度・経度)は、小谷集落の臨時余震観測地点(図-3参照)のものを採用した。サイト増幅特性については、小谷集落の臨時余震観測地点において評価されたもの(図-16参照)を使用した。一方で、サイト位相特性に関しては、EQ-3による観測記録(図-15参照)を採用した。5.(2)で述べたPRITINの値については、小谷集落との位置関係(図-1参照)を考慮して、KiK-net益城および菊陽町役場での実績値(表-2参照)を採用した。非線形パラメータ v_1 、 v_2 の値についてもPRITINの設定根拠と同様に、KiK-net益城および菊陽町役場での実績値(表-2参照)を採用した。ここに、小谷集落とKiK-net益城もしくは菊陽町役場ではサイト特性に有意な差異があるため(図-15および図-16参照)、PRITINや非線形パラメータの値も同様に異なっていた可能性がある。しかしながら、KiK-net益城および菊陽町役場における実績値と異なる値を積極的に採用・定量的に設定するだけの特別な理由がないため、本稿では、KiK-net益城および菊陽町役場における実績値をそれぞれ転用した。

本震時における小谷集落での地震動の推定結果を図-20に示す。図-20(a),(b)に示す小谷集落における推定地震動の速度時刻歴(0.2—2Hz)は、KiK-net益城における観測地震動(図-18(a),(b)参照)よりも明らかに小さいのに対し、菊陽町役場における観測地震動(図-19(a),(b)参照)と最大速度PGVが同程度の値となっている(ただし、地震波形形状は大きく異なる)。一方で、図-20(c),(d)は、2016年熊本地震の本震を対象にした小谷集落での推定地震動、益城町役場近くのサンドウィッチエリア¹⁰⁾における臨時観測点TMP03⁹⁾、KiK-net益城(KMMH16)¹⁾、菊陽町役場⁴⁾で得られた本震記録に対する各々の相対速度応答スペクトル(いずれも減衰定数5%)を比較したもので

あるが、0.1~0.3s付近の周期帯域では小谷集落、概ね0.3s以上の長周期側の帯域ではTMP03およびKiK-net益城における速度応答スペクトルが連続的に上回っている。よって、周期1s付近のやや短周期帯域³⁹⁾や造成宅地の被災に関係の深い周波数帯域(0.5~2Hz)³⁹⁾などでは小谷集落よりもTMP03やKiK-net益城のほうが明らかに大きな速度応答値を示しており、両地点での被災の全体的な程度と矛盾していない。なお、小谷集落に見られる0.1~0.3s付近の相対速度応答の卓越は、サイト増幅特性(図-16参照)のピーク周波数の帯域である5Hz付近と非常に調和的であることから、このスペクトルの特徴はサイト増幅特性に大きく依存しているものと推察できる。

6. まとめ

本研究では、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法を用いて、2016年熊本地震の本震における益城町小谷集落での地震動を推定した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 小谷集落において実施した常時微動計測および臨時余震観測の結果に基づけば、小谷集落とその周辺のKiK-net益城・菊陽町役場・西原村役場におけるサイト増幅特性には比較的大きな差異があるため、KiK-net益城・菊陽町役場・西原村役場で得られた本震観測記録を、本震時に小谷集落に作用した地震動と見なすことはできない。
- (2) 上記(1)で評価した臨時余震観測に基づくサイト増幅・位相特性と野津による特性化震源モデルを組み合わせて強震波形計算を行うことで、KiK-net益城および菊陽町役場における本震観測記録を一定の精度で再現することが可能である。
- (3) 上記(2)と同条件にて、小谷集落を対象に強震波形計算を実施した結果、本震時における小谷集落での推定地震動の相対速度応答スペクトルは、益城町役場近くのサンドウィッチエリアで得られた本震観測記録の相対速度応答スペクトルに対して、0.1~0.3sの周期帯域において上回るものの、0.3s以上の長周期側の帯域では連続的に下回る傾向を示す。

今後は、本稿で推定した本震時の地震動を入力波とした小谷集落の住家や造成宅地を対象とした動的解析を実施するなどして、被災メカニズムの解明などに役立てていきたいと考えている。

謝辞：常時微動計測および臨時地震観測の実施にあたっては、現地の住民の皆様などに大変お世話になりました。常時微動計測の実施では、山内政輝氏(大阪大学学生)および中西一仁氏(金沢大学学生)の支援を仰いだ。本研究の遂行にあたって、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(JP15H05532)」の一部を使用しました。本研究は、(公社)土木学会地震工学委員会地形に残された地震痕跡データの集約と活用に関する研究小委員会(委員長：小長井一男(横浜国立大学教授・東京大学名誉教授))の活動の一環として実施させていただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Uehara, H. and Kusakabe, T.: Observation of strong earthquake motion by National Institute for Land and Infrastructure Management, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.90-96, 2004.
- 4) 西前裕司：気象庁・地方公共団体における震度観測および強震観測について，日本地震工学会大会—2003 梗概集，pp.特 58-59, 2003.
- 5) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: Variation of earthquake ground motions within very small distance, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.66, pp.429-442, 2014.
- 6) 秦吉弥，野津厚：被害地震の揺れに迫る—地震波形デジタルデータ CD 付き—，大阪大学出版会，2016.
- 7) 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.
- 8) 秦吉弥，村田晶，野津厚，羽田浩二，山田雅行，宮島昌克，藤木昂，常田賢一：2014 年長野県北部の地震における白馬村神城地域での臨時余震観測に基づく強震動の広域評価，土木学会論文集 A1，Vol.72, No.4, pp.155-167, 2016.
- 9) Hata, Y., Goto, H. and Yoshimi, M.: Preliminary analysis of strong ground motions in the heavily damaged zone in Mashiki Town, Kumamoto, Japan, during the main shock of the 2016 Kumamoto Earthquake ($M_w7.0$) observed by a dense seismic array, *Seismological Research Letters*, Vol. 87, No.5, pp.1044-1049, 2016.
- 10) 秦吉弥，後藤浩之，吉見雅行：益城町の被害集中域における 2016 年熊本地震本震の地震動とその特徴，科学，岩波書店，Vol.86, No.9, pp.934-941, 2016.
- 11) 秦吉弥：地盤震動(1)～被災地点等での臨時地震観測～，土木学会地震工学委員会平成 28 年度第 1 回研究会講演資料，(公社)土木学会地震工学委員会ホームページ，2016. (last accessed: 2016/12/16)
- 12) 秦吉弥，後藤浩之，吉見雅行，古川愛子，盛川仁，池田隆明，香川敬生：高密度臨時地震観測に基づく益城町の市街地における地盤震動特性の広域評価，第 60 回地盤工学シンポジウム，pp.165-172, 2016.
- 13) 秦吉弥，湊文博，渋谷研一，大川雄太郎，山内政輝，常田賢一：単点微動計測に基づく益城町役場周辺の造成宅地における地盤震動特性の概略評価，Kansai Geo-Symposium 2015 論文集，pp.103-106, 2016.

- 14) 秦吉弥, 湊文博, 後藤浩之, 吉見雅行, 盛川仁, 池田隆明, 香川敬生: 超高密度常時微動計測に基づく益城町の市街地における地盤震動特性の広域評価, 地域安全学会梗概集, No.39, pp.13-16, 2016.
- 15) 秦吉弥, 後藤浩之, 吉見雅行, 古川愛子, 盛川仁, 池田隆明, 香川敬生: 高密度臨時地震観測に基づく2016年熊本地震の本震における益城町役場周辺の造成宅地での地震動の評価, 第7回インフラ・ライフライン減災対策シンポジウム講演集, 土木学会, pp.7-18, 2016.
- 16) 例えば, 盛川仁: 2016年熊本地震調査速報(益城町の被害), 東京工業大学盛川研究室ホームページ, 2016. (last accessed: 2016/12/16)
- 17) 村田晶, 秦吉弥, 土田美悠子, 向坊恭介, 宮島昌克: 熊本地震の益城町小谷地区における建物被害推定のための表層地盤動特性評価, 第36回地震工学研究発表会講演論文集, 土木学会, Paper No.974, 2016.
- 18) 国土交通省国土地理院: 地理院地図(電子国土 Web), 2015. (last accessed: 2016/12/16)
- 19) 産業技術総合研究所: 地質図表示システム(地質図Navi), 地質調査総合センターホームページ, 2013. (last accessed: 2016/12/16)
- 20) 国土交通省国土政策局: 5万分の1都道府県土地分類基本調査[御船], 国土政策局国土情報課ホームページ, 2003. (last accessed: 2016/12/16)
- 21) 熊本県地質調査業協会: 熊本市周辺地盤図, 地盤図編纂委員会編, 267p., 2003.
- 22) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 森川信之, 先名重樹, 工藤暢章, 大井昌弘, はお憲生, 若松加寿江, 石川裕, 奥村俊彦, 石井透, 松島信一, 早川譲, 遠山信彦, 成田章: 「全国地震動予測地図」作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第336号, 2009.
- 23) 松岡昌志, 翠川三郎: 国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング, 第22回地盤震動シンポジウム資料集, 日本建築学会, pp.23-34, 1994.
- 24) 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.
- 25) 秦吉弥, 湊文博, 山田雅行, 常田賢一, 魚谷真基: 和歌山県串本町における高密度常時微動計測, 物理探査, Vol.68, No.2, pp.83-90, 2015.
- 26) 長坂陽介, 野津厚: K-NET 熊本(KMM006)と KiK-net 益城(KMMH16)のサイト増幅特性の再評価—デジタルデータ付き—, (国研)海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所地震防災研究領域ホームページ, 2016. (last accessed: 2016/12/16)
- 27) 秦吉弥, 矢部正明, 葛西昭, 松崎裕, 高橋良和, 秋山充良: 臨時地震観測に基づく2016年熊本地震の強震動の作用によって被災した橋梁地点でのサイト増幅特性の評価, 第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.127-134, 2016.
- 28) 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, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
- 29) 加藤研一: K-NET 強震記録に基づく1997年鹿児島県北西部地震群の震源・伝播経路・地盤増幅特性評価, 日本建築学会構造系論文集, No.543, pp.61-68, 2001.
- 30) 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.
- 31) 野津厚: 2016年熊本地震の本震(M7.3)の特性化震源モデル, (国研)海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所地震防災研究領域 HP, 2016. (last accessed: 2016/12/16)
- 32) 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.
- 33) 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.
- 34) 野津厚, 盛川仁: 表層地盤の多重非線形効果を考慮した経験的グリーン関数法, 地震, 第2輯, Vol.55, pp.361-374, 2003.
- 35) 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.
- 36) 秦吉弥, 門田浩一, 吉田武, 常田賢一, 一井康二, 酒井久和: 有効応力解析及び微動模擬解析に基づく造成宅地を対象とした被災に大きな影響を及ぼす地震動の周波数帯域と固有周波数の関係, 地盤工学会誌, Vol.64, No.10, pp.10-13, 2016.

(2016.10.26受付, 2016.12.16.修正, 2017.2.18.受理)

GROUND MOTION ESTIMATION IN OYATSU RESIDENTIAL CLUSTER, MASHIKI TOWN, JAPAN, DURING THE MAIN SHOCK OF THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE BASED ON HIGH-DENSE MICROTREMOR MEASUREMENTS AND TEMPORARY AFTERSHOCK OBSERVATION

Yoshiya HATA, Akira MURATA, Fumihito MINATO,
Ken-ichi SHIBUYA and Masakatsu MIYAJIMA

Serious damage of wooden houses was occurred in Oyatsu cluster, Mashiki Town, Japan, during main shock of the 2016 Kumamoto Earthquake. In this study, first, microtremor measurement with high dense spatial location was carried out in the cluster. Next, temporary aftershock observation was conducted in the cluster site in order to evaluate the site amplification and phase effects. Finally, based on the local site effects and the characterized source model, ground motions during the 2016 main shock were estimated. The estimated ground motions are will be useful in the detailed study of the failure mechanism.