

# 常時微動計測および臨時地震観測に基づく 益城町小谷集落での地盤震動特性の評価

秦 吉弥<sup>1</sup>・村田 晶<sup>2</sup>・湊 文博<sup>3</sup>・渋谷 研一<sup>4</sup>・宮島 昌克<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> 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

<sup>3</sup> 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

<sup>4</sup> 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

<sup>5</sup> 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

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年熊本地震の前震・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、小谷集落に作用した前震時ならびに本震時の地震動を推定するための基礎的検討として、小谷集落における地盤震動特性を評価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、小谷集落の代表地点において臨時地震観測を実施した。最後に、得られた計測・観測記録に基づいて、小谷集落における経験的サイト増幅・位相特性を評価した。

**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-net<sup>1)</sup>、気象庁<sup>2)</sup>、国土交通省<sup>3)</sup>、地方自治体<sup>4)</sup>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<sup>5)</sup>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<sup>6)</sup>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<sup>7,8)</sup>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<sup>9)</sup>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。また秦ほか<sup>10)</sup>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。さらにまた秦ほか<sup>11)</sup>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。

上述した先行研究<sup>9,10,11)</sup>では、いずれも益城町役場周辺の被災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)、前震・本震による強震動の作用に起因した木造住宅の深刻な被害が報告<sup>12)</sup>されている。

そこで本稿では、前震時ならびに本震時に益城町小谷

集落に作用した地震動を推定するための基礎的検討として、小谷集落における地盤震動特性を評価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、小谷集落の代表地点において臨時地震観測を実施した。最後に、得られた計測・観測記録に基づいて、小谷集落における経験的サイト増幅・位相特性を評価した。

## 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<sup>2)</sup>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<sup>13)</sup>と、その

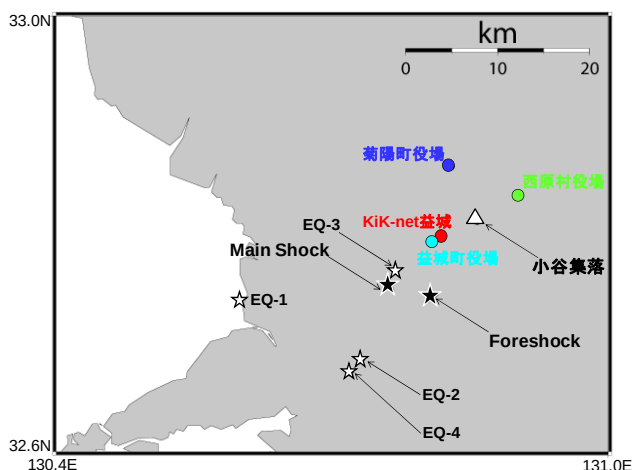


図-1 前震・本震の震央と小谷集落の位置関係

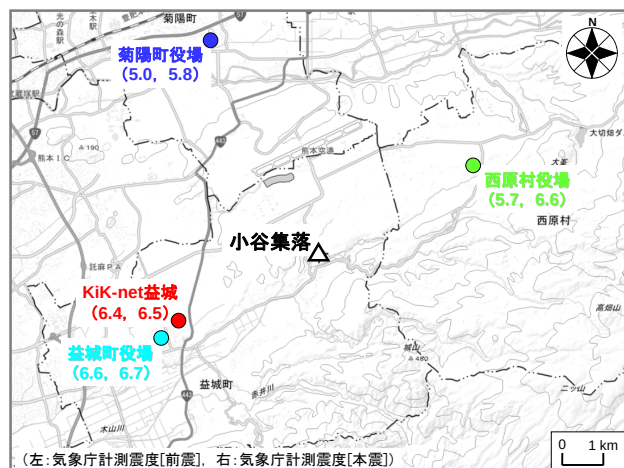


図-2 小谷集落周辺で得られた前震と本震の気象庁計測震度

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。

図-5に(国研)産業技術総合研究所による地質図<sup>14)</sup>、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・地形分類図・土壌図<sup>15)</sup>、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<sup>16)</sup>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-SHIS<sup>17)</sup>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)<sup>18)</sup>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評価する必要性が示唆される。

## 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

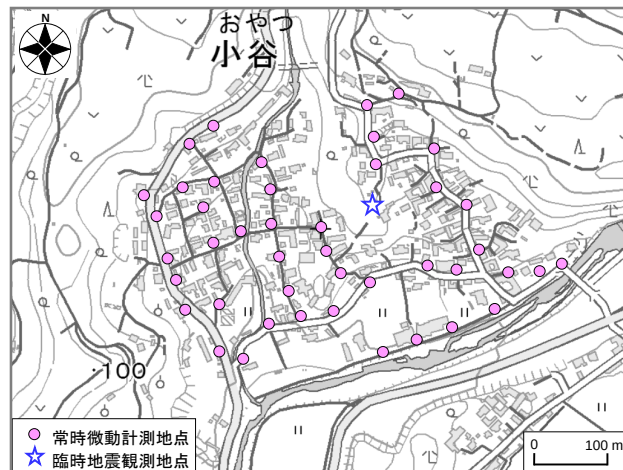


図-3 小谷集落における常時微動計測点の分布



図-4 小谷集落の上空写真(2016/04/15 朝日航洋(株) 協力撮影)

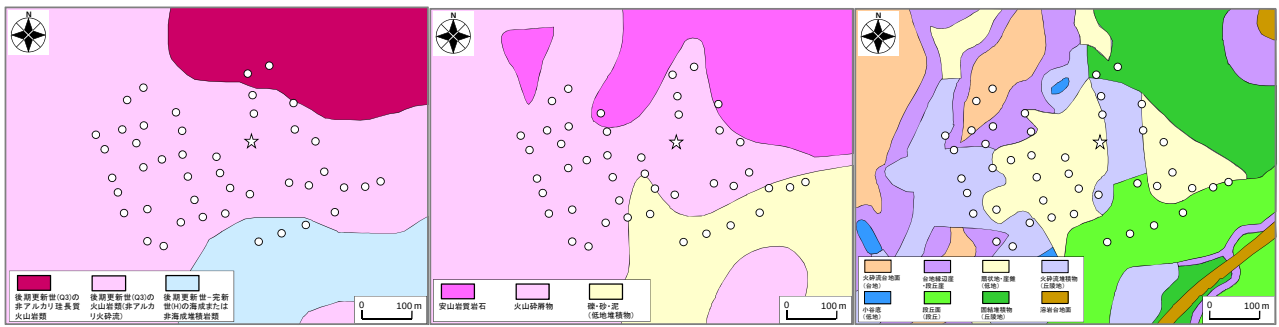


図-5 産総研による地質図<sup>14)</sup>

図-6 国交省による表層地質図<sup>15)</sup>

図-7 国交省による地形分類図<sup>15)</sup>

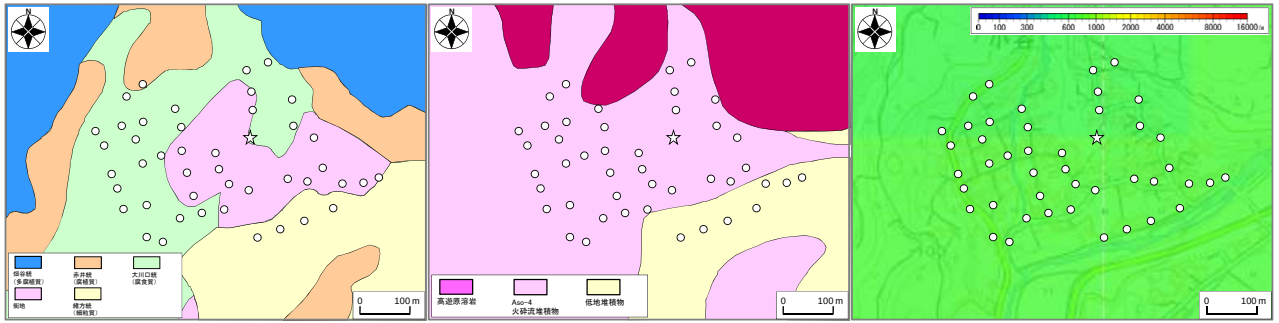


図-8 産総研による土壌図<sup>15)</sup>

図-9 熊本市周辺地盤図<sup>16)</sup>

図-10 J-SHISによる地震基盤の深度分布<sup>17)</sup>

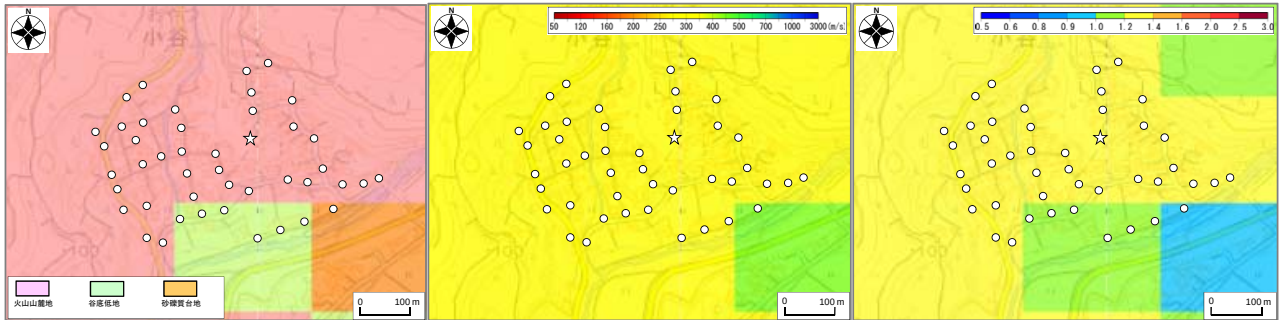


図-11 J-SHISによる微地形区分<sup>17)</sup>

図-12 J-SHISによるAVS30の分布<sup>17)</sup>

図-13 J-SHISによる表層地盤の増幅率<sup>17)</sup>



写真-1 常時微動計測の実施状況例

(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<sup>19)</sup>)を採用した。計測機器の諸元については、文献19)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。

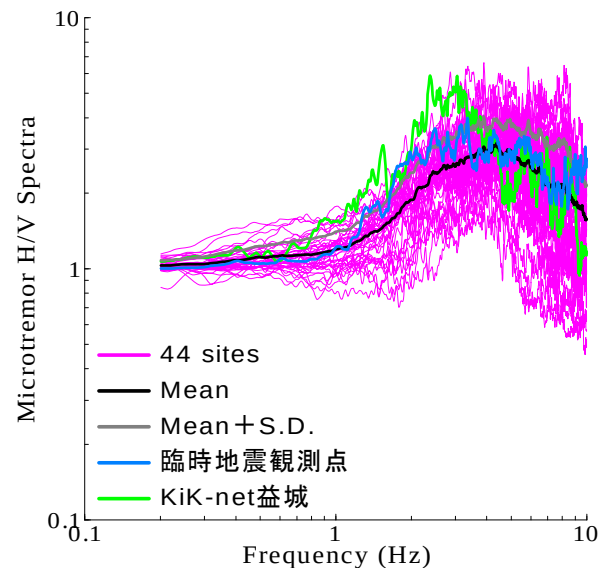


図-14 常時微動H/Vスペクトルの比較

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<sup>20)</sup>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<sup>19)</sup>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<sup>14)</sup>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。

#### 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

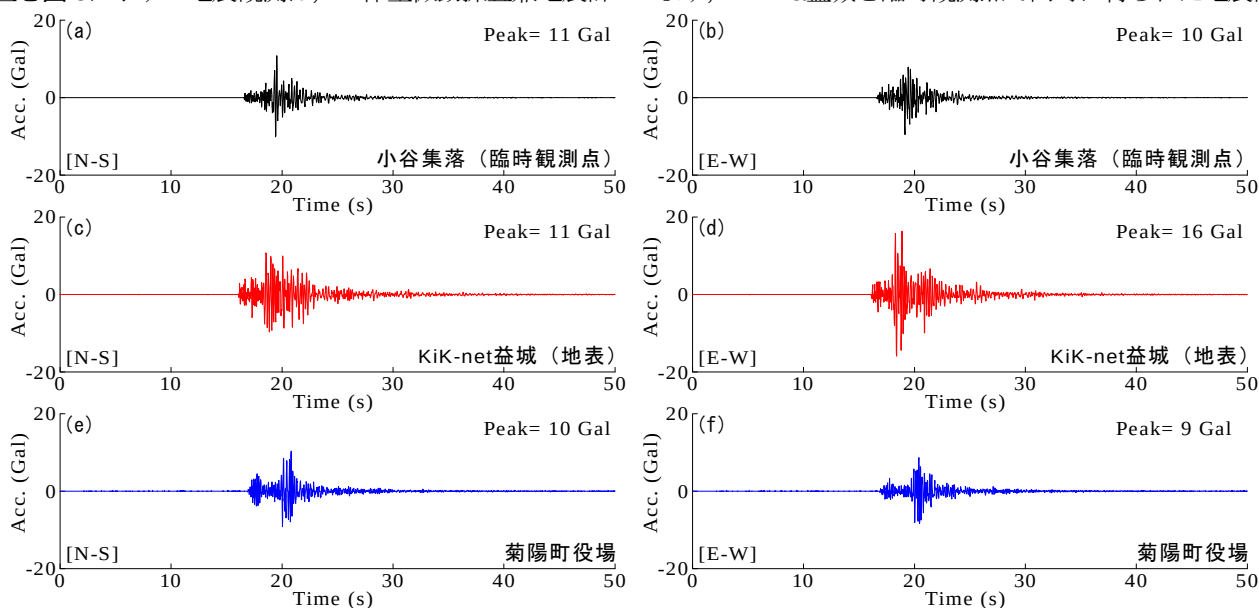


図-15 前震・本震の震源近傍で発生した中小地震(EQ-3)による観測地震動の加速度時刻歴の比較

機器<sup>19)</sup>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, 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定されているため<sup>4)</sup>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利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<sup>21)</sup>、菊陽町役場におけるサイト増幅特性<sup>22)</sup>、西原村役場におけるサイト増幅特性<sup>22)</sup>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<sup>23,24)</sup>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<sup>21)</sup>に掛け合わせることで、小谷集落(臨時観測点)におけるサイト増幅特性を評価した。

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。

## 5. まとめ

本研究では、2016年熊本地震の強震動の作用により深刻な被害が発生した益城町小谷集落を対象に高密度常時微動計測および臨時地震観測を実施し、得られた記録に基づいて経験的サイト増幅・位相特性を評価した。

その結果、小谷集落周辺の既存強震観測点(西原村役場、菊陽町役場、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見なすことができないことが明らかとなった。今後は、本稿で評価した経験的サイト増幅・位相特性に基づいて、前震時および本震時に小谷集落に作用した地震動を推定し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到大変お世話になりました。常時微動計測の実施では、中西一仁氏(金沢大学学生)および山内政輝氏(大阪大学学生)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。

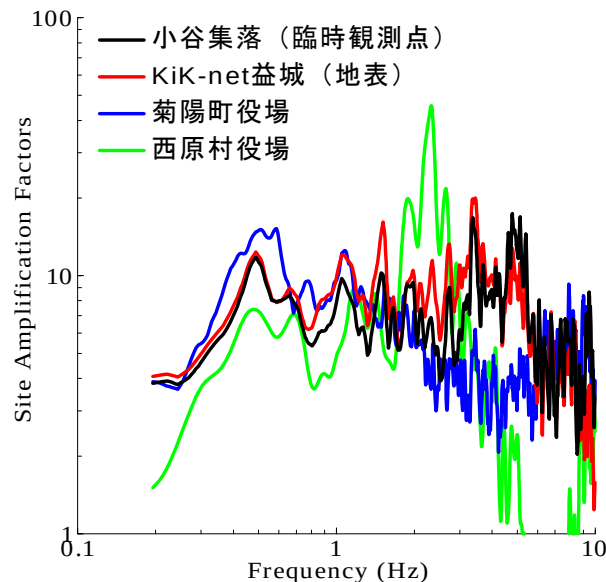


図-16 サイト増幅特性(地震基盤～地表)の比較

## 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.I\_55-67, 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 ( $M_w$ 7.0) observed by a dense seismic array, *Seismological Research Letters*, Vol. 87, No.5, pp.1044-1049, 2016.
- 10) 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: 2016/09/01)
- 11) 秦吉弥, 湊文博, 渋谷研一, 大川雄太郎, 山内政輝, 常田賢一: 高密度常時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広域評価, Kansai Geo-Symposium 2015 論文集, 地盤工学会, 2016. [in press]
  - 12) 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: 2016/09/01)
  - 13) 国土交通省国土地理院: 地理院地図(電子国土 Web), 2015. (last accessed: 2016/09/01)
  - 14) 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: 2016/09/01)
  - 15) 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: 2016/09/01)
  - 16) 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.
  - 17) 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.
  - 18) 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.
  - 19) 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.
  - 20) 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.
  - 21) 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.
  - 22) 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.
  - 23) 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.
  - 24) 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.
  - 25) 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.

(2016. 9. 1 受付)

# EVALUATION OF EMPIRICAL SITE AMPLIFICATION AND PHASE EFFECTS IN OYATSU RESIDENTIAL CLUSTER, MASHIKI TOWN, JAPAN, BASED ON HIGH-DENSE MICROTREMOR MEASUREMENT AND TEMPORARY EARTHQUAKE OBSERVATION

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

Serious damage of wooden houses was occurred in Oyatsu residential cluster, Mashiki Town, Japan, during the 2016 Kumamoto earthquake sequence. In this study, first, microtremor measurement with high dense spatial location was carried out in the cluster. Next, temporary aftershock observation was also carried out at the residential site. Finally, based on the measurement results and the observation records, the empirical site amplification and phase effects were evaluated. The evaluated site effects are will be useful for ground motion estimation in the cluster during the 2016 Kumamoto earthquake sequence.