

2016年熊本地震の前震・本震時に益城町の中心市街地に 作用した強震動の超高密度評価に基づく震災の帯の再現

Simulation of the severely damaged zone due to the 2016 Kumamoto earthquake in central Mashiki Town, Japan, based on strong motion estimation with high density

○秦吉弥¹, 一井康二²
Yoshiya HATA¹ and Koji ICHII²

¹ 大阪大学 大学院工学研究科
Graduate School of Engineering, Osaka University
² 関西大学 社会安全学部
Faculty of Societal Safety Sciences, Kansai University

After the 2016 Kumamoto earthquake sequence, the severely damaged zone by the collapsed houses was occurred in the middle of the residential area of central Mashiki Town, Japan. Regarding this seismic damage, Hata *et al.* (2017) have already conducted microtremor measurements with very high density at 365 sites in the area of interest, and have succeeded appearance of the damaged zone based on T/R frequency ratio. Using the evaluated ground shaking characteristics, strong motion estimation at each measurement site for microtremor in this study. As a result, distribution of the estimated strong motions was agree well with the severely damaged zone. This similarity suggests the applicability of the strong motion estimation with high density in the area of interest.

Keywords: T/R frequency ratio, site effect, strong motion estimation, severely damaged zone, residential land

1. はじめに

2016年熊本地震の強震動の作用による住家倒壊などの深刻な被害は、益城町の市街地において集中的に発生¹⁾している。図-1は、本稿の第一著者が、前震直後の4月14日・本震直後4月16日の日中に、益城町の市街地において住家の倒壊などの深刻な被害が発生している地点をプロットしたもの²⁾である。図-1に示すように、深刻な被害は、益城町の市街地の中段部(いわゆるサンドウィッチエリア³⁾などと呼ばれている)において、特に集中的に発生していることが読み取れる。この特徴的な被害分布を踏まえて、秦ほか^{2),4)}は、益城町の市街地に地震観測点(計20点:図-2参照)および常時微動計測地点(計365地点:図-3参照)をそれぞれ高密度に臨時設置し、当該地点ごとの地盤震動特性を評価している。図-4は、常時微動H/Vスペクトルのピーク周波数の分布である。図-4と図-1を比較すると、H/Vスペクトルのピーク周波数

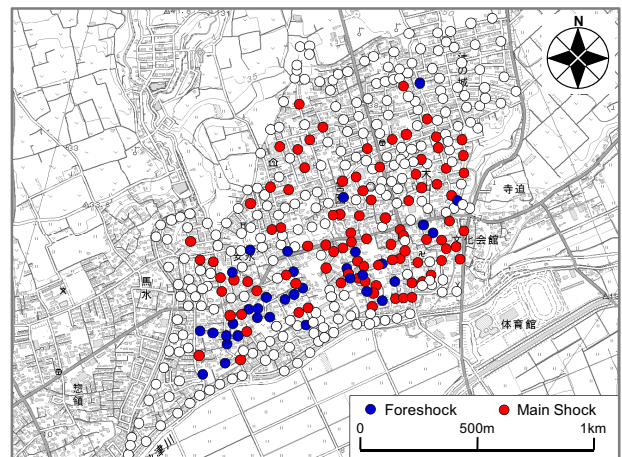


図-1 著者の現地調査による住家被災の実績分布²⁾

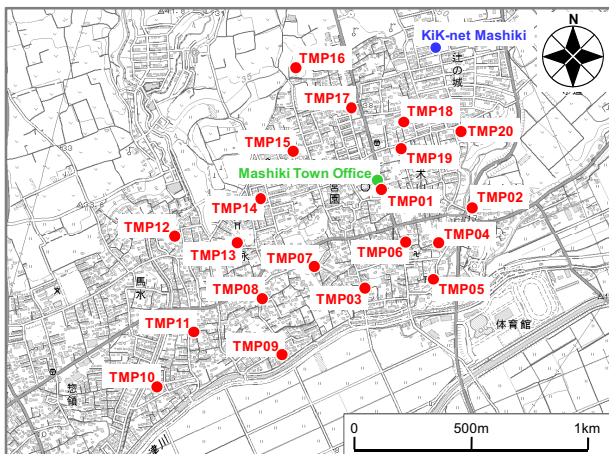


図-2 臨時地震観測点(計20地点)⁴⁾の分布

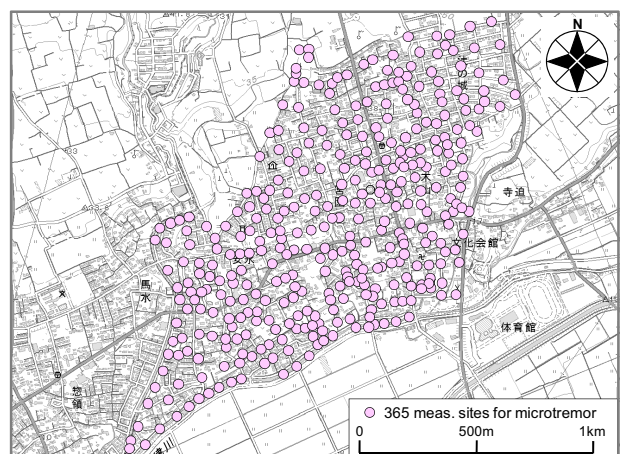


図-3 常時微動計測点(計365地点)²⁾の分布

表-1 特性化震源モデルのパラメータの一覧(前震)⁷⁾

Parameters	Asperity_1	Asperity_2
Fault length (km)	13	
Fault width (km)	12	
Strike (deg.)	212	
Dip (deg.)	89	
Relative rupture starting time (s)	0.0	2.7
Seismic moment (Nm)	0.15×10^{18}	0.13×10^{18}
Asperity length (km)	2.5	3.0
Asperity width (km)	2.5	3.0
Rise time (s)	0.33	0.40
Partition number	$5 \times 5 \times 5$	$5 \times 5 \times 5$
Q value	$Q = 104 f^{0.63}$	
Density (kg/m ³)	2.7×10^3	
Shear wave velocity (km/s)	3.5	
Rupture velocity (km/s)	2.8	
$PRITIN$	0.71 (N-S) and 0.71 (E-W)	

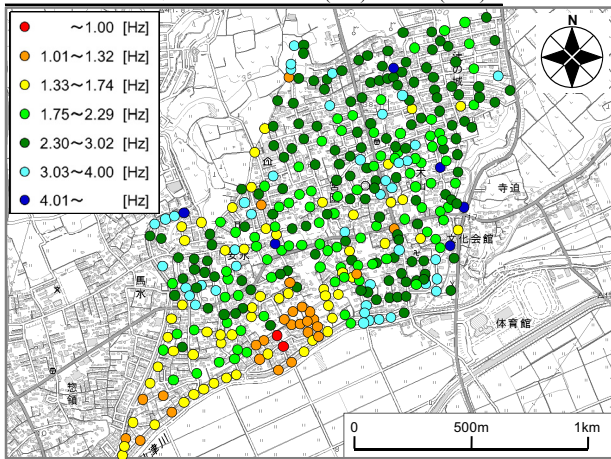


図-4 常時微動 H/V スペクトルのピーク周波数²⁾の分布

表-2 特性化震源モデルのパラメータの一覧(本震)⁷⁾

Parameters	Asperity_1	Asperity_2	Asperity_3
Fault length (km)		40	
Fault width (km)		20	
Strike (deg.)		232	
Dip (deg.)		84	
Relative rupture starting time (s)	0.0	0.9	4.1
Seismic moment (Nm)	0.10×10^{18}	0.25×10^{18}	2.50×10^{18}
Asperity length (km)	1.5	3.0	4.0
Asperity width (km)	1.5	3.0	5.0
Rise time (s)	0.13	0.27	1.00
Partition number	$5 \times 5 \times 5$	$5 \times 5 \times 5$	$10 \times 10 \times 10$
Q value	$Q = 104 f^{0.63}$		
Density (kg/m ³)	2.7×10^3		
Shear wave velocity (km/s)	3.5		
Rupture velocity (km/s)	2.8		
$PRITIN$	0.44 (N-S) and 0.90 (E-W)		

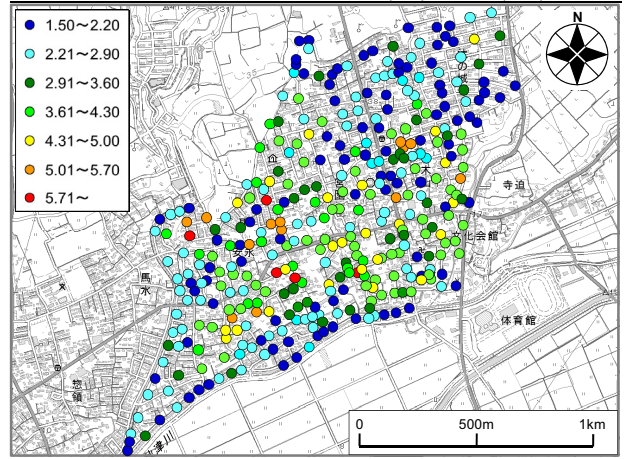


図-5 常時微動 H/V スペクトルの T/R 周波数比²⁾の分布

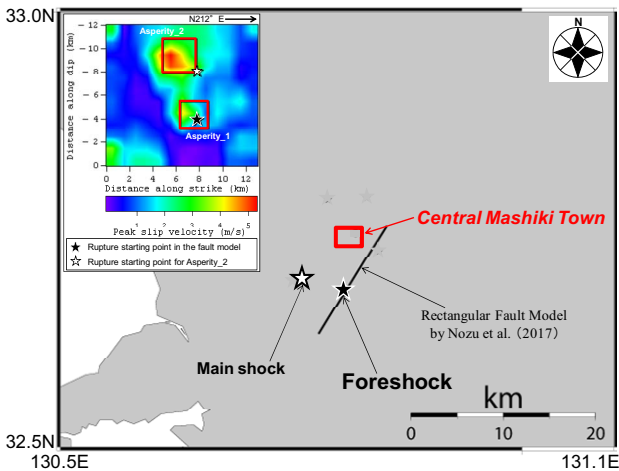


図-6 野津による特性化震源モデル(前震)⁷⁾

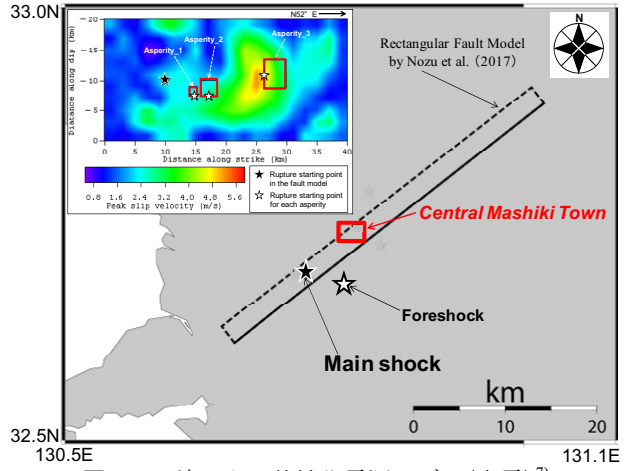


図-7 野津による特性化震源モデル(本震)⁷⁾

だけでは、住家の被災実績を十分に再現できていないと言いはない。一方で、図-5には、H/V スペクトルのトラフ周波数をピーク周波数で除することによって得られる T/R 周波数比⁵⁾をプロットしたものである。図-5と図-1を比較すると、住家の被災実績に対して T/R 周波数比が比較的類似していることが読み取れる。この類似性は、H/V スペクトルから経験的に求められるサイト特性⁶⁾に基づいた強震動シミュレーション⁷⁾を微動計測地点ごとに行えば、2016年熊本地震の前震・本震時に、益城町の市街地に作用した地震動を、広域かつ高密度に評価することが可能であることを示唆するものである。

そこで本稿では、前震および本震を対象とした特性化震源モデル(図-6・表-1および図-7・表-2参照)⁷⁾と、H/V スペクトルから経験的に評価されたサイト増幅・位相特

性^{6),8)}を用いて、前震時ならびに本震時に益城町の市街地に作用した地震動を広域かつ高密度に評価した。

2. 強震動シミュレーション

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⁹⁾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¹⁰⁾で実数、 $G(f)$ はサイト増幅特性⁸⁾で実数、 $O(f)$ は臨時地震観測点(図-4参照)で得られた記録のフーリエ変換で複素数、 $|O(f)|_p$ はその絶対値に対して

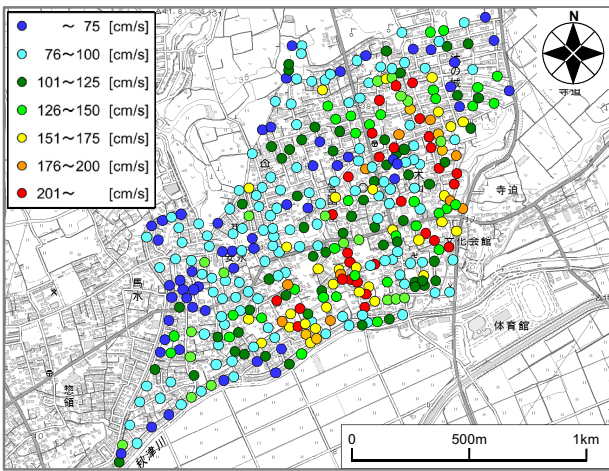


図-8 推定地震動による最大速度 PGV の分布(前震)

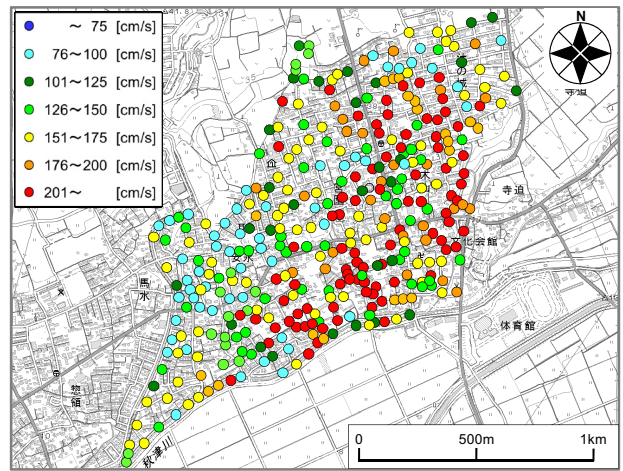


図-11 推定地震動による最大速度 PGV の分布(本震)

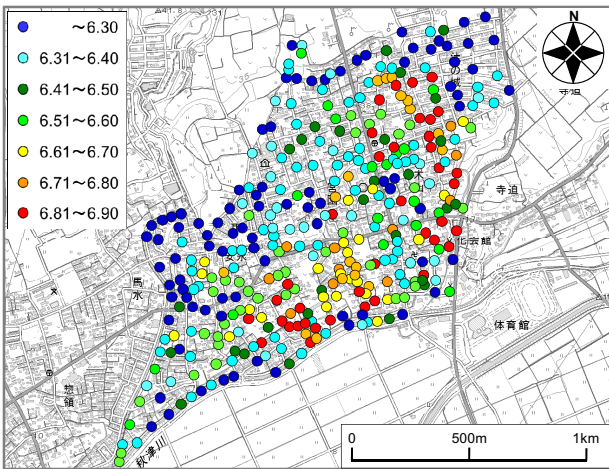


図-9 推定地震動による気象庁計測震度の分布(前震)

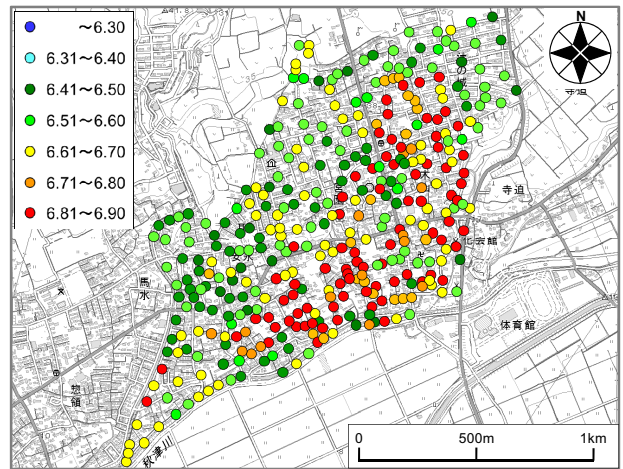


図-12 推定地震動による気象庁計測震度の分布(本震)

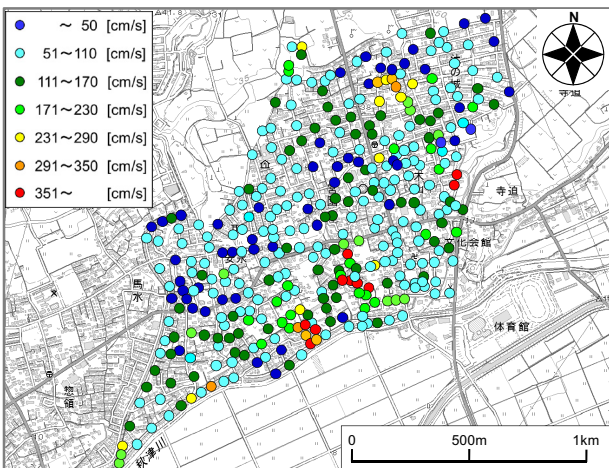


図-10 推定地震動によるSI値の分布(前震)

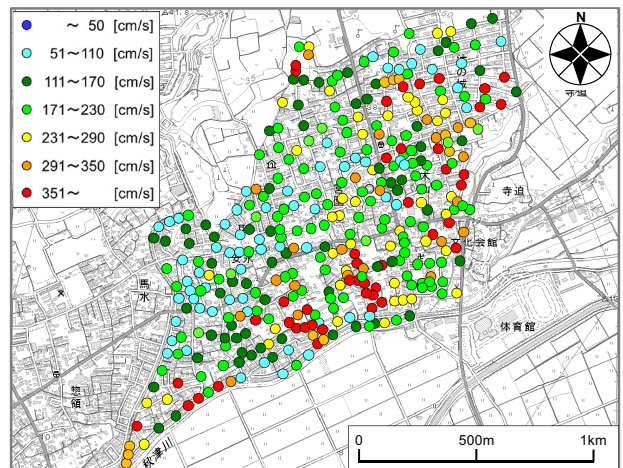


図-13 推定地震動によるSI値の分布(本震)

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¹⁰⁾としては、全方位への平均値(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 $PRTITN$ ¹⁰⁾は、NS・EW 成分の二乗和は 1 となるという制約条件の下で、KiK-net 益城での前震・本震記録による実績値を援用した。

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(近傍の臨時観測点：図-2 参照)で得られ

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¹¹⁾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⁹⁾。

一方で、対象造成宅地内では、少なからず本震時に地盤の非線形応答が生じていた¹²⁾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¹³⁾を用いて波形合成を行った。具体的には、先行研究¹⁴⁾では、益城町の市街地において概ね一様な非線

形パラメータ (v_1 : 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 : 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; 非線形性の影響が大きいほど v_1 は低下・ v_2 は増加) を与えていたため, 住家の被災実績 (図-1 参照) との整合性がそれほど高いとはいえない状況¹⁴⁾であった。そこで本稿では, 益城町の市街地で行われた著者らによるボーリング調査結果¹⁵⁾に加えて他機関によるボーリング調査結果¹⁶⁾などを考慮して, (各地震動推定地点 (各微動計測地点) 近くの) ボーリングによる地盤特性ごとに非線形パラメータを割り振った。

3. 再現結果の一例

図-8~図-10 および図-11~図-13 は, 前震時および本震時における益城町の市街地における推定地震動の最大速度 PGV , 気象庁計測震度, SI 値 (いずれも水平二成分合成) に関する分布である。まず, 図-8~図-10 と図-11~図-13 を比較すると, 前震時よりも本震時のほうが推定地震動の指標値が明らかに大きく, また広域に及んでいることがわかる。次に, 前震・本震による住家の被災実績 (図-1 参照) に対して, 推定地震動の指標値に関する分布 (図-8~図-10 と図-11~図-13 参照) を比較すると, 指標値が比較的大きなエリア (サンドウィッチエリア³⁾) において住家の被災が比較的集中的に発生していることも読み取れる。これらの結果は, 本稿における強震動シミュレーションの実施によって, 一定の精度で益城町の市街地における住家被災の程度を再現可能であることを示唆するものである。なお, 本稿と同様のアプローチを採用すれば, 益城町の市街地に存在する三つの墓地における墓石の転倒実績 (前震・本震直後) を高精度で再現することも確認済み¹⁷⁾であり, 本稿で紹介した強震動シミュレーションの適用性を改めて確認することができる。

謝辞: 常時微動計測および臨時地震観測の実施にあたり, 益城町役場の職員の皆様および益城町の住民の皆様などにお世話になりました。本研究の遂行にあたり, (一社) 環境地盤工学研究所平成 28 年度若手研究者研究助成: 2016 年熊本地震の前震・本震時に益城町の中心市街地に作用した強震動の超高密度評価に基づく震災の帯の再現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断層帯近傍における地震動メカニズム検討小委員会 (委員長: 香川敬生 (鳥取大学教授)) の活動の一環として実施したものである。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 杉野未奈, 山室涼平, 小林素直, 村瀬詩織, 大村早紀, 林康裕: 2016 年熊本地震における益城町の建物被害の分析, 日本地震工学会論文集, Vol.16, No.10, pp.69-85, 2016.
- 2) 秦吉弥, 湊文博, 後藤浩之, 吉見雅行, 古川愛子, 宮本崇, 飯山かほり, 野口竜也, 盛川仁, 池田隆明, 香川敬生: 熊本県益城町の造成宅地での高密度常時微動計測の広域実施による H/V スペクトルと地震被害の関係, 物理探査, Vol.70, pp.35-41, 2017.
- 3) 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.
- 4) 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論文集, 地盤工学会, pp.165-172, 2016.

- 5) Hata, Y., Minato, F., Ikeda, T., Yamada, M., Yamauchi, M. and Okawa, Y.: Evaluation of ground shaking characteristics in residential land based on T/R frequency ratio of microtremor, *Proc. of 4th World Landslide Forum*, Ljubljana, Slovenia, Vol.4, pp.23-35, 2017.
- 6) Hata, Y., Yamauchi, M., Okawa, Y., Minato, F. and Shibuya, K.: Evaluation of ground shaking characteristics based on MSR value — A case of the damaged residential area due to the 2016 Kumamoto earthquake sequence —, *Proc. of 3rd International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, Vancouver, Canada, Paper No.146, 2017
- 7) 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を対象とした強震動の広域推定, 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.
- 8) 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: 2016 年熊本地震での震災帯の成因究明を目的とした益城町の市街地における強震動の広域・高密度評価に関する試み, 第 44 回地盤震動シンポジウム論文集, 日本建築学会, pp.35-46, 2016.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Hata, Y., Yoshimi, M., Goto, H., Hosoya, T., Morikawa, H. and Kagawa, T.: Recovery process of shear wave velocities of volcanic soil in central Mashiki Town after the 2016 Kumamoto earthquake revealed by intermittent measurements of microtremor, *Earth Planets Space*, Springer, Vol.69, No.72, 2017.
- 13) 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, Vol.55, pp.361-374, 2003.
- 14) Hata, Y., Minato, F., Yamauchi, M., Okawa, Y., Ueda, Y., Atoji, S., Goto, H., Yoshimi, M., Furukawa, A., Morikawa, H., Ikeda, T. and Kagawa, T.: Evaluation of local site effects with very high density in central Mashiki Town, Kumamoto Prefecture, Japan, based on temporary earthquake observations and microtremor measurements, and its applications, *Proc. of the International Workshop on the 2016 Kumamoto Earthquake (Japan-USA Joint Workshop)*, Fukuoka, Japan, pp.167-172, 2017.
- 15) 例えば, 吉見雅行, 秦吉弥, 後藤浩之, 細矢卓志, 森田祥子, 徳丸哲義: 熊本県益城町の 2016 年熊本地震被害集中域におけるボーリング調査結果 (速報), 日本活断層学会 2016 年度秋季学術大会講演予稿集, Paper No.P17, 2016.
- 16) 例えば, 高橋秀一, 平田茂良, 大島昭彦, 平井俊之: 2016 年熊本地震における益城町の宅地被害の原因究明のための地盤調査結果, *Kansai Geo-Symposium 2017 論文集*, 地盤工学会, pp.169-174, 2017.
- 17) Hata, Y., Furukawa, A., Goto, H., Yoshimi, M., Morikawa, H., Ikeda, T. and Kagawa, T.: Investigation of tombstone condition at graveyard sites in central Mashiki Town, Kumamoto Prefecture, Japan, and its applications, *Proc. of the International Workshop on the 2016 Kumamoto Earthquake (Japan-USA Joint Workshop)*, Fukuoka, Japan, pp.183-188, 2017.