2016年熊本地震で生じた 地表地震断層ごく近傍の強震動について

香川 敬生¹・吉田 昌平²・上野 太士³

¹正会員 鳥取大学大学院教授 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: kagawa@cv.tottori-u.ac.jp

²学生会員 鳥取大学大学院工学研究科博士後期課程 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: D16T4003B@edu.tottori-u.ac.jp

³学生会員 鳥取大学大学院工学研究科博士前期課程 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: M16T6005U@edu.tottori-u.ac.jp

2016年熊本地震による益城町の被害を調査し、郊外の地表地震断層直近では断層変位による被害は見られても震動に起因する被害が有意に小さいことを確認した。このような現象は過去にも見られており、その要因を考察することは震源断層近傍の地震被害検討にあたって重要である。そこで、地表地震断層は見られるが震動被害が見られない地点(下陳)と地表地震断層から離れて木造家屋の倒壊が見られる地点(田原)において余震観測を実施し、被害差を説明できるほどではないが、被害が見られた地点の方が断層ごく近傍よりも地盤増幅が大きい結果を得た。また、常時微動単点観測を複数の地表地震断層地点で実施した結果、断層ごく近傍では周辺に比べて微動 H/V スペクトルのピークが顕著に見られない傾向があり、地盤の影響が大きいことが示唆された。

Key Words : the 2016 Kumamoto earthquake, Mashiki town, aftershock observation, microtremor observation, surface faulting

1. はじめに

2016年熊本地震では、益城町の被害が顕著であり、同町郊外では地表地震断層も確認されている。これら益城町郊外における地表地震断層出現地点を調査したところ(平成28年5月4, 5日)、本論で対象とした地表地震断層直近では、断層変位による被害を受けた建物は見られるものの、それらの建物の様子からは強震動に起因する被害は小さいと思われた。このような現象は、1995年兵庫県南部地震¹⁾、2011年福島県浜通り地震²⁾、2014年長野県北部の地震³⁾など、過去の被害地震の地表地震断層近傍でも見られている。

同規模の地震でも、地表地震断層が出現する場合とそうで無い場合で地震動に有意な差があり、地表断層を生じた地震の方が小さいこと⁴⁾、またそれが浅い断層すべりの挙動に依存すること⁵⁾が報告されている。さらに、同一地震においても地表断層を生じた部分と生じなかった部分で被害形態に顕著な差が生じる事例も見られる(例えば、1943年鳥取地震における吉岡・鹿野断層部と鳥取市街、1995年兵庫県南部地震の野島断層部と神戸市

街、2014年長野県北部の地震で地表地震断層が出現した北城地区と建物の倒壊が顕著な堀之内地区、など)。

2016年熊本地震でも同様の現象が生じたものと考えられるため、1943年鳥取地震をはじめとする既往地震を含めて地表地震断層の出現の有無による強震動特性を考察することは、震源断層ごく近傍の強震動特性を検討するにあたって重要であると考えられる。

2. 地表地震断層ごく近傍での家屋被害

益城町中心部および郊外のうち、本論で対象とする範囲を図-1に示す。図中の一点鎖線(他の地図も同様)は今回の地震で生じた地表地震断層の分布^{6,7)}、星印は後述する余震および常時微動観測点を示している。

これらのうち、下陳地区では、写真-1に示すように断層変位によって引き裂かれた家屋の被害が見られた。しかし、隣接する農機具倉庫を含めて、変形被害の他には震動によって損壊したと思われる痕跡は見られなかった。この周辺では複数の箇所地表地震断層が見られたが、いずれも断層変位による被害のみで、老朽化した民家な

図-1 対象地域と地表地震断層^(6,7)の分布
(図-2, 7の範囲を枠で示す.)

写真-3 益城町田原における木造建築の倒壊

写真-1 益城町下陳における断層変位による被害

図-2 益城町上陳, 下陳, 田原地区における観測点分布

写真-2 益城町福原における断層変位と周辺の家屋

どに大きな被害は見られず, 強震動による揺れは小さかったと推定される. 上陳地区の分岐断層周辺についても同様であった.

写真-2には, 福原地区の地表地震断層周辺の様子を示す. ここでは, 地表地震断層が家屋のすぐ脇を通っているが, 直近を含めた周辺の家屋には大きな被害が見ら

れず, 強震動の影響を大きく受けていないものと考えられる.

一方で, 上陳地区の北部, 木山川の左岸より北側では古い木造家屋の倒壊が多く見られた. 写真-3に, 木山川右岸の田原地区での倒壊家屋の状況を一例として示す. このような家屋の倒壊被害は強震動による影響と考えられ, 地表地震断層ごく近傍ではなく, やや離れた地域で見られることが興味深い.

3. 余震観測による地盤増幅特性の評価

益城町下陳で断層変位による被害が見られた家屋(写真-1)の隣家のご厚意で, 庭先の地表地震断層直近側に白山工業製のJU410を設置した(図-1, 2のMSKY001). このお宅は無被害で, 本震時に液晶テレビが倒れて壁に傷が残ったとのことのお話であった. 地表地震断層近傍で震動による被害が小さかったと思われるこの地点と対比するため, 北に約1km離れた田原地区において, 写真-3の

倒壊建物の道を挟んだ向かいにあたる、田原地区消防団の倉庫(図-1, 2のMSKY002)にもJU410を設置した。

これら2地点で同時に約24時間の余震観測を実施し、両地点に共通で42地震の観測記録を得ることができた。その一例を図-3に示す。被害が見られた田原の方が、水平動で約75%大きい最大値(図の振幅軸は最大値で正規化)を示しており、有意に大きくなっている。

これらのうち、時間帯によらず交通振動などの影響が小さい、周辺気象庁観測点における最大震度が2以上となった20地震の記録(表-1)を用いて、下陳に対する田原のスペクトル比を求めた結果を図-4に示す。ここでは、図-5に示すように震源分布が対象地点(図-5の三角印)から逆方向となる阿蘇方面と熊本方面に分かれたため、震源位置によってスペクトル比を分けて示している。ただし、全体に熊本方面を震源とする地震が多いため、全体を平均したものは図下段の熊本方面とほぼ同じ傾向を示している。震源方向によってスペクトル比に差異が生じていることは興味深く、今後も追加調査を実施して検討を深めたい。

地表地震断層を生じる場所は堆積層が薄く、地盤増幅による影響が小さいため震動による被害が小さいとも考えることができる。確かに、スペクトル比では下陳よりも田原の揺れが0.1から10Hzのほぼ全ての帯域で大きくなっており、地盤の影響が示唆される。この差を震度に換算⁸⁾すると、平均で0.453(阿蘇方面0.575, 熊本方面0.395)となる。実際の被害から推定される震度は、下陳で地震計を設置させて頂いたお宅では液晶TVが倒れ

表-1 余震観測で得られた地震の諸元

地震リスト	地震の発生日時	震源地名	緯度	経度	深さ	M	最大震度	検索対象 最大震度
1	2016/05/05 12:43:17.8	熊本県阿蘇地方	32°59.9'N	131°08.1'E	11km	M2.7	1	1
2	2016/05/05 12:33:44.8	熊本県熊本地方	32°42.0'N	130°42.8'E	13km	M2.3	1	1
3	2016/05/05 12:14:26.2	熊本県阿蘇地方	32°59.2'N	131°06.5'E	10km	M2.4	1	1
4	2016/05/05 11:55:51.0	熊本県熊本地方	32°45.7'N	130°40.8'E	11km	M2.5	2	2
5	2016/05/05 11:47:43.3	熊本県阿蘇地方	32°59.8'N	131°07.9'E	10km	M2.4	1	1
6	2016/05/05 11:33:17.6	熊本県阿蘇地方	32°59.9'N	131°08.2'E	11km	M2.7	1	1
7	2016/05/05 11:22:48.9	熊本県阿蘇地方	32°59.9'N	131°07.6'E	10km	M2.8	2	2
8	2016/05/05 11:09:03.0	熊本県阿蘇地方	32°59.7'N	131°07.6'E	10km	M2.3	1	1
9	2016/05/05 11:00:19.7	熊本県阿蘇地方	32°58.7'N	131°06.4'E	11km	M2.3	1	1
10	2016/05/05 10:53:37.7	熊本県熊本地方	32°35.3'N	130°44.6'E	7km	M2.5	1	1
11	2016/05/05 10:52:03.7	熊本県熊本地方	32°47.7'N	130°42.5'E	5km	M1.2	1	1
12	2016/05/05 10:48:54.6	熊本県阿蘇地方	32°59.6'N	131°07.7'E	11km	M2.8	2	2
13	2016/05/05 10:48:02.0	熊本県熊本地方	33°00.2'N	131°08.2'E	10km	M3.3	2	2
14	2016/05/05 10:43:26.5	熊本県阿蘇地方	32°59.6'N	131°07.4'E	11km	M2.3	1	1
15	2016/05/05 10:41:51.5	熊本県阿蘇地方	32°59.9'N	131°07.7'E	10km	M2.7	1	1
16	2016/05/05 10:40:12.8	熊本県阿蘇地方	32°59.5'N	131°07.3'E	11km	M4.9	4	4
17	2016/05/05 10:37:07.0	熊本県熊本地方	32°35.3'N	130°44.6'E	6km	M2.3	1	1
18	2016/05/05 10:33:08.6	熊本県阿蘇地方	33°00.1'N	131°08.0'E	11km	M2.9	2	2
19	2016/05/05 10:31:30.4	熊本県阿蘇地方	33°00.0'N	131°08.0'E	11km	M4.6	4	4
20	2016/05/05 10:17:33.1	熊本県熊本地方	32°38.5'N	130°41.9'E	5km	M1.8	1	1
21	2016/05/05 07:28:28.6	熊本県熊本地方	32°24.8'N	130°34.7'E	10km	M2.6	1	1
22	2016/05/05 06:32:31.9	熊本県熊本地方	32°48.0'N	130°43.2'E	5km	M1.8	1	1
23	2016/05/05 05:27:37.7	有明海	32°44.0'N	130°36.0'E	13km	M2.5	1	1
24	2016/05/05 04:58:34.1	熊本県熊本地方	32°47.5'N	130°46.6'E	6km	M2.4	2	2
25	2016/05/05 04:21:21.1	熊本県熊本地方	32°47.2'N	130°46.9'E	4km	M2.3	2	2
26	2016/05/05 03:17:10.2	熊本県阿蘇地方	33°02.0'N	131°09.2'E	9km	M3.4	2	2
27	2016/05/05 01:21:30.5	熊本県熊本地方	32°35.8'N	130°40.7'E	6km	M3.2	3	3
28	2016/05/05 00:25:18.1	熊本県熊本地方	32°42.3'N	130°42.8'E	10km	M2.7	2	2
29	2016/05/04 23:37:49.6	熊本県熊本地方	32°36.6'N	130°43.1'E	5km	M3.1	3	3
30	2016/05/04 22:24:17.1	熊本県熊本地方	32°36.6'N	130°43.1'E	5km	M3.5	4	4
31	2016/05/04 22:16:45.9	熊本県阿蘇地方	32°57.2'N	131°04.4'E	7km	M2.5	2	2
32	2016/05/04 22:14:12.9	熊本県熊本地方	32°37.3'N	130°42.3'E	3km	M1.7	1	1
33	2016/05/04 21:43:11.8	熊本県熊本地方	32°33.8'N	130°40.6'E	8km	M2.7	1	1
34	2016/05/04 20:11:27.1	熊本県熊本地方	32°42.6'N	130°42.5'E	12km	M2.0	1	1
35	2016/05/04 19:24:06.9	熊本県熊本地方	32°48.7'N	130°49.2'E	8km	M2.6	1	1
36	2016/05/04 19:20:04.3	熊本県熊本地方	32°48.8'N	130°49.3'E	8km	M4.0	4	4
37	2016/05/04 19:09:09.7	熊本県熊本地方	32°36.9'N	130°43.1'E	4km	M2.1	2	2
38	2016/05/04 18:15:30.3	熊本県熊本地方	32°37.3'N	130°43.2'E	4km	M2.5	2	2
39	2016/05/04 17:16:52.1	熊本県熊本地方	32°44.4'N	130°46.5'E	17km	M3.8	2	2
40	2016/05/04 16:22:31.4	熊本県熊本地方	32°37.0'N	130°43.1'E	5km	M3.4	3	3
41	2016/05/04 15:55:25.7	熊本県熊本地方	32°49.5'N	130°45.9'E	6km	M2.3	1	1
42	2016/05/04 15:06:05.3	熊本県熊本地方	32°44.0'N	130°37.9'E	13km	M2.5	1	1

図-3 下陳(上)および田原(下)の同時観測記録例

図-4 田原/下陳の平均スペクトル比

図-5 解析に用いた余震の震央分布

た程度とのことなので震度5弱～5強（5.0程度），田原では耐震性の低いと思われる木造家屋が多く倒壊しており震度6強（6.0以上）と推定され，震度にして1.0以上の差があったものと考えられる．余震観測の結果からは，この違いに両地点の地盤増幅の違いが影響していることが明らかではあるが，その差を全て説明できてはいない．余震観測記録は振幅の小さい線形応答であると考えられるが，本震時に地表地震断層を生じた際には非線形応答によって断層直上の地震動が軽減され，より大きな震度差が生じたことも想定される．この要因については別途検討したい．

4. 常時微動観測による地盤震動特性の評価

地表地震断層を生じた地点では，断層ごく近傍において，断層を挟んだ2点あるいは断層付近で単点3成分微動観測を実施した（図-2のMSK0xx地点）．対象としたのは，益城町杉堂（図-1），下陳で余震観測を実施した地点を含めて2ヶ所，上陳，福原（図-1）および益城町中心部の山山付近（図-1および図-7）の6地域である．

何れの地点でも，H/V スペクトルのピークが明瞭に見えないことが特徴として挙げられる（図-6）．また，断層を挟んだ狭い範囲で H/V スペクトルの形状に大きな変化は見られず，堆積層厚の急激な変化は無いように思われる．

強震動による被害が集中した益城町中心部では，より広範囲に単点3成分微動観測を実施した．図-7に実施位置と微動H/Vの卓越周期分布を示す．図中，MSK001およびMSK002は益城町役場敷地内，MSK003はKiK-net益城観測点で実施したものである．被害集中域を横断するほぼ南北の側線を設定し，約50m毎に観測点を設置した．卓越周期は木造家屋の固有周期に対応する0.25～0.55秒の広範囲に分布し，場所毎の変化が大きいのに見えるが，観測点周辺における個々の被害との明瞭な相関は

図-6 断層ごく近傍のH/Vスペクトル例

図-7 益城町中心部の単点3成分観測点と微動H/V卓越周期

見られないようである．

次に，MSK009からMSK018までの各地点におけるH/Vスペクトルの変化を追ったものを図-8に示す．なお，図の赤線は各地点におけるスペクトル比1のレベルを示している．図中，赤矢印で示した場所に明瞭なピークが見られている．このことから，表層地盤の下位にコント

ラストの大きい境界が存在し、大きな地盤増幅をもたらしたことが推察される。一方で、MSK011からMSK012に掛けてピーク周期が長周期側にシフトし、ピークがやや小さくなっている。また、MSK013では明瞭なピークが見られなくなっていることが分かる。活断層研究者の現地踏査⁹⁾では、MSK011とMSK012の間に地表地震断層の存在が示唆されており、この付近でH/Vスペクトルのピークが変化するとともに不明瞭となっているのは、図-6で指摘したこととも共通する。なお、写真-4にこの付近の様子を示す。カラーコーンの立てられている部分が断層変位に相当する。この辺りには比較的新しい住宅が多い傾向があるが、いずれも震動による大きな被害は受けていないように見受けられる。

図-8 益城町中心部の微動H/Vスペクトルの変化

写真-4 益城町中心部で地表地震断層とされている付近の様子

このように地表地震断層が現れた場所で微動 H/V スペクトルのピークが明瞭ではなくなる傾向は、1943 年鳥取地震における鹿野断層付近で実施した高密度微動観測でも見られており⁹⁾、今後その成因を検討したい事象である。本研究では益城町およびその郊外の数地点を対象としたのみであるが、2016 年熊本地震で現れた他地域の地表地震断層や過去に発生した地震の地表地震断層近傍においても同様の調査を実施し、このような現象が地表地震断層直上で共通に見られるものかを確認した上で、その成因を探って行きたい。

5. おわりに

2016 年熊本地震本震で生じた地表地震断層ごく近傍において、余震観測および常時微動単点 3 成分観測を実施した。余震観測からは、地表地震断層ごく近傍であるものの強震動による被害が小さかった地点に比べて、断層から離れているものの顕著な震動被害が見られた地点は震度にして平均 0.45 程度揺れが大きく、地盤による影響が示唆される結果となった。しかし、本震時の被害から推定される震度差 1.0 以上を説明するには小さく、本震時に地表地震断層ごく近傍の地震動をさらに小さくする要因を検討する必要性も示唆された。また、単点 3 成分微動観測からは、周囲では明瞭に見られる微動 H/V スペクトルのピークが、地表地震断層ごく近傍においては不明瞭となる傾向が見られ、地盤応答による影響が示唆された。断層ごく近傍域の地盤震動特性、特に本震時の非線形応答、および地下構造をより詳細に調査解析する必要がある。今回の解析は、限られた調査時間の中で実施したごく一部の地域における観測記録のみを対象としており、2016 年熊本地震で生じた地表地震断層の全域にわたる結果とはなっていない。今後調査を追加して、普遍的な事実を抽出して行きたい。

また、地表地震断層が出現する場所においては、ごく浅層部における断層すべりによる短周期 S 波の放射、地表面に向かう S 波中間項・近地項の影響、また断層破砕帯における非線形地盤応答など、断層ごく近傍の強震動に影響を及ぼす様々な要因を複合的に検討する必要がある。今回対象とした 2016 年熊本地震に加えて、1943 年鳥取地震でも鹿野断層直上の民家は断層変位によって基礎が大きくずれて建物に大変形を生じたものの震動による倒壊には至らず¹⁰⁾、一方でやや離れた鹿野町中心部で多数の倒壊を伴う大被害を生じた事例がある。また過去に地表地震断層を生じた地震でも同様の事例が見られる。これらを参考に、地表地震断層ごく近傍における強震動特性の課題に取り組んで行きたい。

謝辞：調査の実施にあたり、観測場所や一時的な駐車ス

ペースを快くお貸し頂いた現地の皆様に感謝します。全ての観測には白山工業製の JU410 を利用しました。また、本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究(C)「1943 年鳥取地震鹿野断層端部における断層変位と強震動が被害に及ぼした影響の分析」(平成 27~29 年度)の助成により実施されました。また一部の図の作成には GMT¹¹⁾および ArcGIS を用いました。

参考文献

- 1) 松田磐余：1995 年兵庫県南部地震の地震断層と地形から見た被害状況総合都市研究，第 57 巻，pp. 5-18, 1995.
- 2) 久田嘉章，久保智弘，松澤佳，松本俊明，田邊朗仁，森川淳：2011 年福島県浜通り地震の地表地震断層近傍における建物被害調査，日本地震工学会論文集，第 12 巻，第 4 号（特集号），pp. 104-126, 2012.
- 3) 久田嘉章，石川理人：2014 年 11 月 22 日長野県北部地震での地表地震断層近傍での建物被害（速報）<<http://kouzou.cc.kogakuin.ac.jp/Open/report/2014-11-Nagano-EQ-hisada.pdf>> (2017/01/12 閲覧)
- 4) Somerville, P. G. : Magnitude scaling of the fault ruptures directivity pulse, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 137, pp. 201-212, 2003.
- 5) Kagawa, T., Irikura, K. and Somerville, P. G. : Difference in ground motion and fault rupture process between the surface and buried rupture earthquake, *Earth Planets and Space*, Vol. 56, pp. 3-14, 2004.
- 6) 熊原康博，後藤秀昭，中田高，松多信尚，石山達也，石黒聡士，廣内大助，堤浩之，渡辺満久，鈴木康弘：2016 年熊本地震・地表地震断層に関する緊急速報 (4/19) <<http://jsaf.info/jishin/items/docs/20160420164714.pdf>> (2017/01/12 閲覧)
- 7) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター：2016 年熊本地震に伴って出現した地表地震断層，「第四報」緊急現地調査報告[2016 年 5 月 13 日] <<https://www.gsj.jp/hazards/earthquake/kumamoto2016/kumamoto20160513-1.html>> (2017/01/12 閲覧)
- 8) 鶴来雅人，澤田純男，宮島昌克，北浦勝：サイト増幅スペクトルに基づく震度増加量の推定法，土木学会論文集，No. 738, pp. 191-205, 2003.
- 9) 野口竜也，上野太士，香川敬生，西田良平，吉田昌平：微動および地中レーダー探査による鹿野断層の地盤構造の把握，日本地震学会講演予稿集，2016 年秋季大会（投稿中）
- 10) 西田良平，黒川泰，赤木三郎：1943 年鳥取地震に伴う吉岡・鹿野断層とその周辺部の地変について，鳥取大学教養部紀要，Vol. 27, pp. 187-226, 1993.
- 11) Wessel, P. and Smith, W. H. F. : New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS, American Geophysical Union, 1998.

(2016. 11. 3 受付，2017. 1. 13 修正，2017. 2. 18 受理)

STRONG MOTION CHARACTERISTICS IN THE VICINITY OF SURFACE FAULT RUPTURE AT SUBURBS OF MASHIKI TOWN DUE TO THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE

Takao KAGAWA, Shohei YOSHIDA and Hiroshi UENO

Aftershock and microtremor observations were conducted in the vicinity of surface fault ruptures at suburbs of Mashiki town due to the 2016 Kumamoto earthquake. Our target of the observations is searching out the difference of ground motions between surface faulting areas without severe damages and severely damaged areas without surface faulting. From aftershock observation, ground motion at damaged site is larger than that at surface faulting site without damage, however, average difference of JMA seismic intensity between the two sites are less than 0.5 while estimated difference from witness and real damage is more than 1.0. From microtremor observations, H/V spectra at surface faulting regions are rather flat and do not to have steep peak while clear peaks are observed around the faulting areas.