# 平成28年熊本地震に関する報告書

# 東北大学 災害科学国際研究所

平成 29 年 4 月

#### まえがき

平成28年4月14日以降に断続的に発生した熊本地震は、益城町、西原村、南阿蘇村、 熊本市などの地域を中心に甚大な被害を引き起こしました. 被災された方々には心よりお 見舞い申し上げます. 熊本地震は、地中で長い間眠っていた活断層(日奈久断層帯や布田 川断層帯)が突如として活動を始めた直下型地震であり、一連の地震活動において、16日 の本震を含めて震度7が2回観測されたのは観測史上初めてのことでした. さらに、余震 活動も長期化し、内陸地震では中越地震を超えて観測史上最大の発生数となりました。

東北大学災害科学国際研究所では、これまでの災害対応の経験と教訓を活かし、被災地 や関係大学への支援や協力をさせていただきたいと思い、災害情報の蓄積を目的とした被 害調査を実施し、事業継続計画や緊急医療も含めて総合的な活動を展開させていただきま した.本報告書は、その活動の中で得られた知見や教訓を整理したものです.地震直後の 被災地の様子、地震特性、断層活動、構造物・家屋・地盤の被害、可能性津波の評価など の理学的・工学的観点の調査や分析に加えて、事業継続(BCP)、被災者の行動、NPOの 活動、避難所運営、ボランティア活動、報道動向、仮設住宅などの社会的観点でも調査を 実施し、現状分析による問題点の整理を行いました。また、医学分野からは、本研究所の スタッフが災害時派遣医療チーム(DMAT)として現地医療支援に参加するとともに、地 震後の医療や保険の実態に関して調査や分析を実施いたしました。

さらに、被災地の国立大学である熊本大学とは、リーディング大学院プログラムなどを 通じて研究だけでなく教育の観点でも協力して活動を展開しています.将来の防災・減災 を担う人材育成は重要なテーマであり、本報告書には、その教育を目的とした活動につい ても触れています.本報告書が被災地の復興、および今後の災害対応への貢献、さらには 学術研究や学問融合の発展の一助になれば幸いです.

> 平成 29 年 4 月 4 日 東北大学災害科学国際研究所 所長 今村文彦

# 目次

1.	被害地域の地震動と地盤震動特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ ]
2.	地震直後の被災状況 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 12
3.	地表地震断層 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 25
4.	木造建物の被害 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 45
5.	社会基盤と地盤・斜面の被害 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51
6.	可能性津波の評価解析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 80
7.	地震後の医療・保健に関する取り組み ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 91
8.	被災者行動パターンの被災・回復過程 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 101
9.	企業の被害と事業継続 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 114
1 0	平成 28 年熊本地震に係る NPO のボランティア支援活動 ・・・・・・・・ 143
1 1	、報道動向に関する分析 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 151
1 2	応急仮設住宅と住宅復興 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 156
13	熊本大学×東北大学 市民公開講座 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 164
14	地表設置型合成開口レーダーによる地滑りモニタリング ・・・・・・・・ 166
付録	(熊本大学×東北大学 市民公開講座 報告書)

## 第1章 被害地域の地震動と地盤震動特性

# 大野晋(東北大学災害科学国際研究所地域地震災害研究分野) 三辻和弥 (山形大学地域教育文化学部)

ここでは,2016年熊本地震の被害地域で観測された地震動特性について述べるとともに, 被災地域で行った地盤の常時微動測定及び地盤・基礎被害の状況について報告する。

1.1 地震の概要

2016 年熊本地震の前震・本震及び主な余震の震央位置を図1に,諸元と最大震度を表1 に示す<sup>1)</sup>。益城町では前震(M6.5)と本震(M7.3)双方で震度7を,西原村では本震で震度7 を計測している。

番号	子 発震時		震央地名	深さ(km)	М	最大震度階	最大震度階観測地
1	4月14日	21時26分	熊本県熊本地方	11	6.5	7	益城町宮園
2	4月14日	22時07分	熊本県熊本地方	8	5.8	6弱	益城町宮園
3	4月15日	0時03分	熊本県熊本地方	7	6.4	6強	宇城市豊野町
4	4月16日	1時25分	熊本県熊本地方	12	7.3	7	益城町宮園,西原村小森
5	4月16日	1時45分	熊本県熊本地方	11	5.9	6弱	合志市竹迫, 菊陽町久保田,熊本東区佐土原
6	4月16日	3時03分	熊本県阿蘇地方	7	5.9	5強	阿蘇市一の宮,阿蘇市内牧,南阿蘇村中松
7	4月16日	3時55分	熊本県阿蘇地方	11	5.8	6強	産山村山鹿
8	4月16日	7時11分	大分県中部	6	5.4	5弱	由布市湯布院町川上
9	4月16日	9時48分	熊本県熊本地方	16	5.4	6弱	熊本東区佐土原
10	4月18日	20時41分	熊本県阿蘇地方	9	5.8	5強	産山村山鹿, 阿蘇市波野
11	4月19日	17時52分	熊本県熊本地方	10	5.5	5強	八代市松江城町,八代市平山新町
12	4月19日	20時47分	熊本県熊本地方	11	5	5弱	八代市千丁町,八代市鏡町,氷川町島地,宇城市小川町
13	4月29日	15時09分	大分県中部	7	4.5	5強	由布市湯布院町川上

表1 主な地震の地震諸元と最大震度階



図1 2016年熊本地震の前震・本震及び主な余震の震央位置 1)

#### 1.2 被害地域の地震動

2016年熊本地震の前震と本震の震源地付近の地震記録を図2と3に示す。観測点地図に は産業技術総合研究所シームレス地質図<sup>20</sup>を用い,防災科学技術研究所と気象庁の観測点を 赤で,熊本県の観測点を青で示している。波形としては周期 10s 以上の成分を除いて加速 度波形を積分して求めた速度波形(東西方向成分)を示している。

前震の波形はいずれも継続時間が短くパルス的であること、益城町内の KMMH16 と益 城町役場の振幅が 91-136cm/s と特に大きいことがわかる。一方本震の速度最大値は前震よ りもさらに大きく、益城町の 2 点で 133-180cm/s,西原村で 231cm/s に達している。西原 村の値は、周期 10s 以下の成分としては、これまでに日本の内陸地震で観測された記録の 最大値である。

本震の波形は、南西側よりも北東側でパルス的な傾向を示し、前震よりも長周期成分を 多く含んでいる。これらはそれぞれ断層破壊の北東側への進展 <sup>30</sup>と地震規模の増大及び地表 断層の出現に伴うものと思われる。さらに KMM004 や熊本市富合町のように周辺観測点よ りも長周期成分を多く含む波形が見られるが、前者は阿蘇山のカルデラの影響が、後者は 熊本平野の盆地構造の影響が大きいものと思われる。

図 4 は速度波形の粒子軌跡を示したものである。益城町及び西原村の卓越方向は東西方 向に近いことがわかる。現地調査においても、益城町では東西方向の建物倒壊が多い傾向 がある。兵庫県南部地震の神戸のように、内陸地震の震源近傍では震源メカニズム解の方 向性と破壊伝播効果の相乗効果による断層直交成分の卓越がしばしば報告されるが、今回 はむしろ断層走向に近い成分が卓越している。この理由としては、益城町では破壊伝播効 果が現れるような位置にないこと、西原村では断層のごく浅い部分が滑ったことによる影 響が指摘されている<sup>3</sup>。

図 5 は前震と本震の地震記録の擬似速度応答スペクトル(東西成分)を比較したもので ある。前述の通り、本震の振幅の方がほぼ全ての地点で大きいこと、益城町では 1Hz 付近 で卓越しているが、西原村ではより低周波成分の振幅が大きいこと、カルデラ内の KMM004 や熊本平野内の富合町では低周波成分(0.3-0.4Hz)が卓越していることが確認できる。

 $\mathbf{2}$ 



図2 4/14 M6.5 前震の速度波形(東西成分)



図3 4/16 M7.3 本震の速度波形(東西成分)



図 4 4/16 M7.3 本震の速度波形の粒子軌跡



図 5 4/14 M6.5 前震及び 4/16 M7.3 本震の疑似速度応答スペクトルの比較(東西成分)

ここでは Hata et al., 2016 による熊本地震本震の臨時観測の公開データについて紹介さ せていただいておりましたが,該当論文の共著者からデータに問題があることが指摘さ れております。同論文の取り扱いが明らかになるまでは該当部分の公開を差し控えさせ ていただきます。

1.3 過去の被害地震記録との比較

過去の内陸地震(1995年兵庫県南部地震と2004年新潟県中越地震)において, 甚大な 被害があった地区の観測波形と2016年熊本地震での益城町と西原村の波形を図7に, 擬似 速度応答スペクトルを図8に示す。

波形の継続時間が短くパルス的であること,周期 1s 付近で卓越していることは共通している。益城町の記録は兵庫県南部地震や新潟県中越地震の振幅を上回っていること,西原村では 1s 付近の振幅は下回るものの,2s 以上の長周期帯域の振幅は過去の内陸地震における被災域の倍以上の振幅になっていることがわかる。



図7 過去の内陸地震の被災域の観測波形と2016年熊本地震の観測波形



図8 過去の内陸地震の被災域と2016年熊本地震の擬似速度応答スペクトル

1.4 被害地域の地盤の常時微動特性と地盤・基礎被害

2016年熊本地震では多くの地点で建物倒壊・地盤崩壊・液状化などの振動被害が発生した。の。これらの振動被害の原因を検討する上で、その地点の地盤震動特性を把握することは 重要である。本稿では、熊本市・益城町・西原村の振動被害域で行った単点地盤常時微動 測定と、その結果得られた水平/上下スペクトル比(以下 H/V スペクトル,ピーク周波数 は地盤の S 波卓越周波数に概ね対応する)およびその周辺の地盤及び基礎構造の被害状況 について報告する ?。

表2に観測位置と周辺の被害状況を、図9に観測位置を示す。熊本市、益城町、西原村 各6地点であり、熊本市では建物被害と液状化被害のあった場所を、益城町では地震計 (KiK-net KMMH16)と建物被害の集中発生域を、西原村でも地震計(西原村役場震度計)と住 家被害の集中発生域で観測を行った。地質図上では、更新世の火山岩類(西原村と益城町 の北側)、更新世段丘堆積物(益城町南側と熊本市東区)及び完新世(熊本市南区)に分類 されている。

地区	観測位置	場所	周辺被害状況・備考
熊本市	KI	熊本市西区稗田町稗田南公園	7階RC造ピロティ層崩壊
	K2	熊本市南区近見一丁目ふれあい公園	液状化
	K3	熊本市南区刈草中央公園	液状化
	K4	熊本市南区刈草町緑地	液状化
	K5	熊本市東区尾ノ上錦ヶ丘公園	南東側でRC店舗大破
	K6	熊本市東区秋津新町水玉公園	低層RC造大破,高層非構造材被害
益城町	MI	益城町辻の城公園	KiK-net KMMH16
	M2	益城町辻の城	木造建物全壊
	M3	益城町安永	木造建物全壊
	M4	益城町秋津川河川公園	
	M5	益城町宮園	
	M6	益城町馬水	
西原村	N1	西原村役場西側	西原村震度計設置付近
	N2	西原村布田	
	N3	西原村布田	木造建物全壊
	N4	西原村小森	
	N5	西原村小森畑	木造建物全壊
	N6	西原村小森風当	木诰建物全壊

表2 常時微動測定位置と周辺被害状況



図9 観測点位置(記号は表 1.4-1 参照)背景は産総研シームレス地質図<sup>2)</sup>

#### (1) 熊本市建物被害地区

熊本市では、西区でピロティが層崩壊した7階建てRC造付近(K1)、南区で液状化が集 中的に発生した地区(K2-K4)、東区で低層RC造が大破および高層集合住宅の非構造材が 損傷した地区(K5,K6)で測定を行った。結果を図10及び図11に示す。

常時微動H/Vの卓越周波数は、K1で0.7Hz付近および3Hz付近、K2-K4地区では1Hz付近、 K5で3Hz付近、K6で2Hz弱となっており、西側で卓越周期が長周期化している。



図 10 熊本市建物被害地区の被害写真,常時微動 H/V スペクトル,近傍地震記録 pSv



図 11 熊本市液状化地区の被害写真,常時微動 H/V スペクトル,近傍地震記録 pSv

図11の上図にはK2-K4の各地点における被害を示す。いずれの地点でも液状化による地 盤及び基礎構造被害が見られた。K2地点周辺では南北に伸びる道路に沿って、液状化によ る噴砂の跡が数多く確認されたほか、木造建物を中心に多くの建物が沈下・傾斜の傾向を 示していた。K3地点周辺でも鉄道高架沿いに南北に走る道路に沿って噴砂が確認された。 また、K2地点やK4地点の写真に見られるように、隣接する建物が「おじぎ」をするような 形で傾斜している様子も確認された。K4地点周辺では木造住宅や鉄骨造の小規模建物に沈 下・傾斜の傾向が複数見られた。

(3) 益城町

益城町では、KiK-net KMMH16位置(M1)と、その南側の建物被害集中域(M2-M6) で測定を行った。結果を図12に示す。卓越周波数は、北東側はM1,M2,M4で2-3Hz程度であ るが、南西側に行くにつれ1.5Hz付近へと長周期化していること、それに伴い比のピーク振 幅も大きくなる傾向がある。なお、建物被害率はM2-M3地点で高くなっている。

図13の上図にはM2、M4、M6の各地点における被害を示す。M2地点はKiK-net KMMH16 のM1地点からやや南に位置している。北から南に緩やかに下る傾斜した地形であり、写真 に示すように傾斜の方向に擁壁の崩壊が複数確認された。M4地点周辺では河川沿いの地盤 変状により擁壁の倒壊や地盤被害が多く確認され、1階が層崩壊した住宅も見られた。M6 地点では河川沿いに地盤変状が見られ、写真に示すように最大で30cm程度のマンホールの 浮上りも見られた。M4-M6の河川沿いの観測点付近では多くの地盤変状が確認されたが、 住宅の上部構造の被害は比較的軽微であった。



図 12 益城町の被害写真,常時微動 H/V スペクトル,近傍地震記録 pSv

(4) 西原村

西原村では、震度計が置かれている西原村役場付近(N1)と、南側の布田地区(N2,N3) 及び東側の小森地区(N5,N6)の老朽木造家屋集中被害域および、その中間地点のN4地点 の結果を図13に示す。

共通して2Hz付近に大きなピークがある。布田地区ではN2よりもN3で被害が大きいが、 観測H/VではN3の方がやや長周期化(4Hz→2Hz)している。また、小森地区でもN4,N5に 比べて被害の大きいN6の方が長周期化(2.5,3Hz→2Hz弱)する傾向にある。

図13の上図にはN3及びN6の各地点における被害を示す。N3地点の南側の集落では大き な被害が見られた。N3地点の左側の写真は基礎高さが約60cmと一般的な住宅の基礎よりも やや高い住宅である。このように基礎が剛強な住宅では、柱梁接合部の折損や骨組の残留 変形、屋根瓦の被害など、上部構造により大きな被害が出る傾向が見られた。一方、N3地 点の右側の写真のように擁壁近くに建てられた住宅で、擁壁の崩壊により基礎下の地盤に 大きな変状が起こった場合などに基礎が損傷して大きく変形し、その影響によって不同沈 下を起こすなど、上部構造が大きく変形する被害も数多く見られた。N6地点周辺の写真は 手前に見える玉石擁壁が崩壊したことにより宅地地盤が大きく変形し、住宅の基礎が損傷 したことにより不同沈下を起こしたと思われる。

これまでの地震被害の際にも指摘されてきたように、基礎が剛強である場合は上部構造 の損傷の程度が大きくなり、基礎の損傷が顕著な場合には上部構造の被害は比較的軽くな る傾向が見られたが、宅地地盤の変形やそれに伴う擁壁の崩壊が数多く見られ、基礎が剛 強でない場合には前述のように地盤被害の影響を受けて上部構造が不同沈下したと思われ る被害例も複数見られた。一方、擁壁や宅地地盤が大きく崩壊していても、擁壁位置から 十分に離れた位置に建てられた住宅は基礎の被害を免れていた例も見られた。



図 10 から図 13 には測定位置に近い強震観測点の擬似速度応答スペクトルも示している が、中小地震(小振幅時)の卓越周波数は常時微動の H/V の卓越周波数と近く、これらは 地盤応答によるピークと思われる。1.2 でも述べたように、被害地域の地震動には地盤増幅 が大きく寄与しているものと思われる。

#### <謝辞>

気象庁、防災科学技術研究所、熊本県の震度計の記録を用いました。

<参考文献>

- 1) 平成 28 年(2016 年)熊本地震の評価, 地震調査研究推進本部, 2016.5.13
- 2) 産業技術総合研究所シームレス地質図:https://gbank.gsj.jp/seamless/
- 3) 2016 年熊本地震で何が起きたか,第44 回地盤震動シンポジウム,日本建築学会
- 4) Preliminary Analysis of Strong Ground Motions in the Heavily Damaged Zone in Mashiki Town, Kumamoto, Japan, during the Mainshock of the 2016 Kumamoto Earthquake (Mw 7.0) Observed by a Dense Seismic Array, Yoshiya Hata, Hiroyuki Goto, and Masayuki Yoshimi, Seism. Res. Lett., Vol.87, 5, pp. 1044-1049.
- 5) 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,境有紀・纐纈一起・神野達 夫,日本建築学会構造系論文集,555, pp.85-91,2002
- 6) 熊本地震による建築物等被害調査報告(速報),建築研究所, http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/2016/index.html
- 7) 2016年熊本地震の被災地域における常時微動 H/V スペクトルと観測点周辺における地盤及び基礎構造の被害、大野晋・三辻和弥、日本地震工学会第12回年次大会梗概集、 P2-38,2016

### 第2章 地震直後の被災状況

村尾修(東北大学災害科学国際研究所国際防災戦略研究分野)

柴山明寛(東北大学災害科学国際研究所災害アーカイブ研究分野)

森口周二(東北大学災害科学国際研究所地域安全工学研究分野)

杉安和也(東北大学災害科学国際研究所グローバル安全学トップリーダー育成プログラム)

震度7の地震が観測された2016年4月14日の翌日の15日,地震被害の概要を把握し, 以降に続く基本的な情報を入手することを目的として,災害科学国際研究所の最初の調査 団が派遣された.我々調査団は15日の深夜に八代市内のホテルに到着し,各自の部屋で翌 朝からの調査に備えていた矢先に本震に見舞われた.数十名の宿泊客は屋外に避難し,様 子を見守っていたが,幾度もの余震が発生し,ホテルの外壁も剥がれ落ちる状況であった. それ以降,ホテル内に戻ることは出来ず,避難所となった近くの公民館で朝まで避難する ことになった.数時間後,まだ日が昇らないうちに熊本市内に向けて調査に出発したが, 午前中には阿蘇山の小規模噴火もあり,熊本空港も閉鎖していたため,慎重を期して日程 を繰り上げて,午後に鹿児島空港から仙台に戻ることになった.結果的に調査としては満 足できるものではなかったが,本稿ではこうした第一調査団の調査経過について報告する.

2.1 初動調査の概要と目的

当初予定していた初動調査の概要と目的を以下に示す.実際に調査したのは村尾教授, 柴山准教授,森口准教授の3名であり,杉安助手は研究所にて各種情報の収集を行い,そ れらを適宜 Google Earth 上に展開し,調査団メンバーが適切に調査を実施できるよう後方支 援を担当した.

①調査メンバー

村尾修(国際防災戦略研究分野)

柴山明寛(災害アーカイブ研究分野)

森口周二 (地域安全工学研究分野)

杉安和也(リーディング大学院)(所内後方支援)

②目的

2016年4月14日21時26分に発生した震災状況(建物,社会基盤施設)の調査および災害科学国際研究所としての継続的な調査のための情報収集

③調査期間

2016年4月15日(金)~17日(日)

④主な調査地

益城町および熊本市内

#### 2.2 実際の活動経過

こうした調査を予定していたが、4月16日1時25分の本震により、変更を余儀なくされた. 初動調査時の活動経過と震度階数の推移<sup>1)</sup>を図1と表1に示す. 次節以降、時間経過に応じた各地の状況について報告する.



図1 初動調査時の活動経過と震度階数の推移

_		
4月15日	17:30	仙台空港発
	20:30	熊本空港着(伊丹空港で乗り継ぎ)
	21:00	益城町を通過(簡単に調査:町中停電.家屋被害多数.町役場前で炊
		き出しを確認.
	22:00	熊本市内を通過(簡単に調査:この時点で市内で大きな被害なし.停
		電もほぼなしの状態.)
	23:30	ホテル到着(八代市)
4月16日	1:25	M7.3の地震発生(八代市で震度6弱, 熊本市で震度6強)→ホテルで
		の宿泊が不可能になる.
	2:30	避難所(八代市太田郷出張所)へ移動(簡単に調査:スペース、トイ
		レ等問題なし)
		※ 震度 4~6 レベルの地震が頻発. ほぼ睡眠できず.
	8:00	宇城市役所周辺を調査(避難者多数.自衛隊による給水あり.道路や
		家屋に被害あり.)
	9:00	宇土市役所および周辺を調査(自衛隊による給水あり.周辺の建物に
		は大きな被害なし.)
		鹿児島空港へ向けて移動,経路上を簡単に調査
	15:00	鹿児島空港到着 → 羽田空港経由で仙台へ

表1 初動調査時の活動経過

2.3 4月15日夜の熊本市内の状況

2.3.1 熊本空港

4月15日の夜,熊本空港に到着した直後の状況を写真1に示す.空港到着時には,被災 調査や支援のために熊本入りをしたと見られる人々が多く見られた.電光掲示板には交通 ダイヤの乱れに関する情報が表示されており(写真1左),損傷した2階の保安検査場の 天井の修復工事が行われていたが,その他目立った被害は見当たらなかった.市内へのバ スも運行しており(写真1中),売店等の商品も豊富に揃っており(写真1左),前日(14 日)の地震による空港運営業務への影響はそれほど大きくはなさそうであった.(その後 の16日未明に発生した本震により,空港は18日まで閉鎖されることになる.)



写真1 熊本空港の状況(4月15日21時頃)

2.3.2 益城町

空港でレンタカーを借り、まずは4月14日の地震により震度7が観測された益城町を訪れた. 15日夜の段階では、益城町役場周辺のみ停電が発生しており、役場から数百メートル離れたあたりでは既に電気が復旧していた(写真2上左).しかし、震度7が観測されただけあって町内にはブロック塀の倒壊(写真2上右)や多数の家屋被害(写真2下)が見られた.

町中にあるコンビニエンス・ストアが営業していた.店内では,弁当類はほとんど品切れであったが,その他の食品は多数置かれていた(写真3左).また前日の地震により散乱した店内を片付けている最中であったが(写真3右),商品の販売はしていた.





写真2 益城町の状況(4月15日21時半頃)



(店員の許可を得て撮影) 写真 3 益城町内コンビニエンス・ストアの状況(4月15日21時45分頃)

2.3.3 国道 28 号沿い

益城町から国道 28 号を通り熊本市街地に向かった.そこでは、一部損壊から中破程度の 被害を受けた建物(壁の剥落,パチンコ店1階エントランスのガラス飛散など)が見られ たものの(写真 4),停電もなく、ガソリンスタンドや飲食店も営業していた.この時点で の普段とさほど変わらない街の雰囲気から、翌日からの本格的調査は比較的容易に遂行で きると考えていた.そして、八代市内のホテルに向かった.



写真4 国道28号線沿いの状況(4月15日22時頃)

2.4 4月16日未明に発生した本震後の対応

#### 2.4.1 ホテルでの被災

熊本市内を抜け、予約をしていた八代市内のホテルに到着したのは15日が終わろうとし ている頃であった.翌日の調査の準備を終え、眠りに就こうとしていた1時25分、気象庁 マグニチュード7.3の本震が発生した.筆者(村尾)の部屋は6階に位置していたが、大き く揺れ、立っていられないほどの状況であった.一旦、揺れが収まり、荷物を持って、非 常階段を伝い、急いで外に避難した.その間に幾度かの余震を感じたが、時にはホテル前 の新八代駅のガラスを大きな音とともに揺らすこともあった.

館内では「非常階段を使って避難してください」との放送がかかっていた.ホテル前に は宿泊客(100名程度いただろうか)が無事に避難を終え(写真5左),スタッフが安否確 認のための点呼を行い始めた(写真5右).見たところ,怪我人は皆無であるらしく,し ばらくすると近くの公民館への避難誘導が始まった.ホテルスタッフの緊急時対応はとて も適切であったのが印象的であった.



写真5 本震後のホテル前での避難(4月16日2時頃)

2.4.2 避難所(八代市太田郷公民館)

避難した場所は八代市太田郷公民館であった.我々が到着したのは,徐々に人が集まり 始めた頃であった(写真6上左).公民館の外の駐車場スペースは半分ほどが自動車で埋 まっており,また室内への避難を避けたペットと飼い主等が屋外に避難をしていた.玄関 ホールには受付名簿(氏名,住所,電話番号,入所時刻,退所時刻を記入)があり,掲示 板には安否確認名簿が貼り出されていた(写真6上右).

公民館は1階建てであり、会議室、和室、多目的室などで構成されていたが、畳のある 和室が避難者によって最初に占められていた.講堂内ではとりあえず荷物だけを持って避 難してきた人々が、自分たちの場所を確保しているという状況であり(写真6下左),空 間的には余裕があった.

八代市の震度は6弱であったが,館内の電気と水道は停止しておらず,トイレも使用可 能であった.テレビのある「ふれあいサロン」では,人が集まり,ニュースにより被災後 の状況を見守っていた.また3時過ぎから,ラジオの音声を館内放送で流し始めていた. 避難所では、全体的に混乱している様子はほとんど見られず、スマートフォンで情報収集 する姿も多数見られた.

我々はここでしばらく待機し、6時前に調査に出発した.



写真6 避難所の状況(4月16日2時半過ぎ)

- 2.5 被災状況
- 2.5.1 ホテルの被害

避難所を出て,まずは宿泊していたホテルに立ち寄った.地震発生時に大きく揺れたホ テルの外壁はタイルの剥離が見られ(写真7上左),その破片が床に落ちていた(写真7 上右).また正面玄関前の床はひび割れが生じており,ホテルの裏側の柱にはせん断破壊 が見られた.



写真7 ホテルの被害(4月16日6時頃)

2.5.2 宇城市役所およびその周辺

その後、八代市から熊本市街地に向かって移動を始め、まずは震度6強を観測した宇城 市役所(写真8上左)に向かった.宇城市役所の建物裏手のガラス面は飛散していたもの の(写真8上右)、大きな建物被害は見受けられず、エキスパンションジョイントの被害 も見られなかった(写真8下左).ただし、建物周辺では数カ所の地盤沈下が見られ(写 真8下右)、郵便ポスト等も傾いていた.

宇城市役所の敷地内には既に多くの自衛隊車両が入っており(写真9上左),入浴施設の提供(写真9上右)や給水(写真9下)など,自衛隊による救援救助活動が始まっていた.





写真8 宇城市役所(4月16日8時20分頃)



写真9 宇城市役所における救援救助活動(4月16日8時30頃)

宇城市役所の周辺は古い木造住宅の多い住宅地であった.ブロック塀の倒壊(写真 10 上 左)や道路のひび割れ(写真 10 上右)の他に,屋根や瓦屋根の落下(写真 10 下)などの 被害がとくに目についた.



写真10 宇城市役所周辺の被害(4月16日8時40頃)

2.5.3 宇土市役所

移動中,適宜最新情報の入手に努めていた.その中で宇土市役所庁舎の被害情報が入っ てきたため,現場に向かった.宇土市役所庁舎は写真11右のように,4階部分が崩壊して いた.外郭部の飾り柱だけでなく,構造体としての柱が梁よりも先に降伏して被害を受け ていた.しかも,低層部よりも先に4階部分が被害を受けていた.被災メカニズムに関す る詳細な調査が必要であると思われた.

同敷地内では石碑の転倒や車庫のレンガ壁の崩壊などが見られたが、周辺の建物には甚 大な被害がほとんど見られなかった.



#### 写真11 宇土市役所の被害(4月16日9時頃)

2.5.4 国道3号線沿いの被害(宇城市内)

宇土市役所の被害を調査した後,熊本市内に向かっている途中で,阿蘇山の噴火情報が入ってきた.調査中,災害科学国際研究所の緊急調査ワーキンググループとは密な情報交換を行っていたが,この噴火情報を受け,一度仙台に戻って調査を仕切り直した方が良いという判断が下された.調査団はその判断に従い,仙台に戻ることにした.熊本空港は閉鎖されてしまっていたが,急遽帰路を鹿児島空港からの便に変更することが出来たため, 人代市から北に向かっていたルートを南へと引き返すことにした.

我々が利用していた国道3号線は日奈久断層とほぼ平行であり、断層から離れるほど被 害が軽減されていたのが良くわかった. 宇城市内の途中で1971年以前に建てられたと思わ れる住宅がいくつか倒壊している場所があったため、その周辺も調べた. 被災した建物は とくに土葺き瓦屋根の民家であった. 写真12左の建物はその一例であるが、同敷地内にあ る新耐震以降に建てられた木造住宅の被害(写真12右)は微小なものであった.

その後,鹿児島空港に向けて移動したが,前日15日とは異なり16日は本震の影響で信 号の支障が多々見られた.また熊本市内に近いほど,ガソリンスタンドにおける給油の列 が長くなる傾向が見られた.



写真 12 宇城市内の被災地(4月 16日 11時頃)

2.6 後方支援と Google Map を用いた情報提供

災害後の被災調査をする際,事前に情報を収集し,地図やノートにメモとして書き記し, 紙媒体を持参して,現場を訪れる,という方法は一般的である.しかし,調査をしている 際にも今回の本震発生のように事態が急変したり,調査に必要な情報が新たに入ってきた りするということが多々ある.村尾と杉安は,2011年東北地方太平洋沖地震後の被災調査 の際に Google Map をプラットフォームとして利用した調査を試み<sup>2)</sup>,その有効性を実感し ていたが,本調査でも同様の調査方法を用いた.

図1は今回の調査で用いた Google Map 上の情報提供画面の一例である. 杉安は現地調査 には行かずに研究所に残り,後方支援を行った. 具体的には,調査団と連絡をとりながら,

インターネット等を用いて各地の地震動と震度,活断層位置,被災状況(火災発生,地盤 災害,社会基盤被害,構造物被害,文化財被害等),関連する公共施設の位置情報,避難 所の設置状況,関連する画像情報などを入手し,調査団のニーズと対応した情報発信を行 った.

現場で調査している我々は、状況に応じて必要な情報を依頼し、新たな情報をスマート フォンやコンピュータの Google Map 画面で確認しながら、調査を実施することができた. 調査を終えた後も、このプラットフォーム上に新たな情報が加えられ、所内での情報共有 に活用された.



図2 Google Map による情報提供



.

図3 スマートフォン上の情報

#### 2.7 まとめ

調査を終え,4月16日の夜に仙台に到着した.当初予定していた調査は不完全なものに 終わってしまったが,19日には調査の報告会が開催された.以下は,当該初動調査のまと めとして報告会で示されたものである.その後,研究所内でいくつかの調査が実施され, 支援活動や学術的交流も展開されている.それらについては,以降の章に譲りたい.

①古い建物に被害集中 新しい建物は軽微な被害

建築基準法の新耐震設計基準が施行される 1981 年以前に建設されたために,現行の耐震 基準を満たさない,いわゆる既存不適格建物に被害が集中している.一方,最近の建物は 全体的に被害が軽微である.既存不適格が数多く分布するのは,熊本に限らず日本全国の 地方都市に共通する大きな問題である.

②ブロック塀被害が数多く点在

東日本大震災では、あまり見られなかったブロック塀の被害が数多く見られた.鉄筋が 入っていない塀が数多くあり、それらが転倒している. ③断層沿いに被害が集中 特に瓦屋根の被害が多い

九州地方なので台風対策としての瓦屋根は有効だが、地震時にはトップへビーな条件に なるので、被害が出やすい.

④防災拠点の確実な耐震化の必要性

宇土市役所は、本震と繰り返し発生する余震による繰り返し荷重と建物自体の老朽化が 大きな原因とは思われ、耐震性が十分でなかった可能性がある.市役所は病院や小中学校 とともに需要な防災拠点であるため、周辺の建物よりも耐震性に優れた状態を保つべく、 より確実なメンテナンスと必要に応じた補強の徹底が望まれる.阪神淡路大震災の神戸市 役所の被害の教訓が十分に活かされていない.

⑤直下型被害地域が拡大,広域化

震度 5~6 レベルの余震が高頻度に発生するため、一般市民も行政も対応が難しく、大き なストレスとなる.少しずつ揺れの強い地域を変えながら頻発するので、直下型でありな がら広域の被害のイメージを受ける.

⑥災害要援護者(高齢者を含む)に対するケア

高齢者比率の高い地域が被災した. 避難所生活および今後の復旧・復興活動の中での充 分なケアが必要である.

<参考文献>

- 1) 気象庁:「平成 28 年(2016 年) 熊本地震」について(第 11 報, 4 月 17 日 10 時 30 分 現在), http://www.jma.go.jp/jma/press/index.html?t=1&y=28(2016.4.17 閲覧)
- 2) 杉安和也,村尾修:モバイル端末を活用した茨城県内における東日本大震災建物被害初 動調査,シンポジウム「モバイル'12」,133-136,モバイル学会,2012.3

### 第3章 地表地震断層

# 遠田晋次(東北大学災害科学国際研究所国際巨大災害研究分野) 岡田真介 (東北大学災害科学国際研究所地盤災害研究分野) 石村大輔 (首都大学東京都市環境学部地理環境コース) 高橋直也(東北大学大学院理学研究科)

ここでは、平成28年熊本地震に伴う地表地震断層(以下,地震断層)や関連した地表変 状について調査した結果を報告する.調査は、平成28年4月16日(土)~4月30日(土)、 5月7日(土)~11日(水)、6月11日(土)~16日(木)、平成29年3月15日~23日 の期間で実施したものである.当グループは地震断層帯全域を一通り調査したが、詳細調 査については大学合同調査グループ(熊原ほか、2016)に加わり西原村など特定の地域分 担のもとで調査を実施した.ここでは、大学合同調査グループで共有してとりまとめた調 査結果を総括して報告するものである.

3.1 熊本地震にともなう地表地震断層の概要

平成28年4月16日に発生した熊本地震(M7.3, Mw7.0)では、甲佐町・御船町・益城町・西原村・南阿蘇村にかけて、北北東から北東に延びる長さ約30kmの地表地震断層(以下、地震断層と呼ぶ)が現れた(図1).これらは、阿蘇カルデラ内の約5kmの地震断層を除き、主として既知の日奈久断層と布田川断層(活断層研究会、1991;中田ほか、2001; 池田ほか、2001)に概ね沿って出現し、1.0-2.5m程度の右横ずれ変位を伴った(図2).

地震断層の分布域は、地震調査研究推進本部(地震調査研究推進本部,2013)の日奈久 断層帯高野白旗区間の一部,布田川断層帯布田川区間にあたる.また断層帯中央部では、 布田川断層に並走して北落ちの正断層型の地震断層も出現した.これも概ね既知の出ノロ 断層(九州の活構造,1989;活断層研究会,1991)にあたる.

以下には各区間での調査結果を記す.

25



図1 平成28年熊本地震にともなう地表地震断層(赤線)と活断層(青線)の分布(熊原 ほか,2016)



図2 日奈久断層北東端,布田川断層,出ノロ断層沿いに出現した地震断層の変位量分布



図3 調査写真位置図(赤:地表地震断層,青:その他の地表変状)

#### 3.1.1 布田川断層沿いの地震断層

布田川断層では、益城町東部の堂園(どうぞん)地区で2.2mの最大の右横ずれを計測した. 堂園地区では畑の畦や畝が断層によって明瞭に食い違っており(図4a),断層はこの堂 園から西に向かって大きく2つに分岐する. 北側の地震断層は、木山川周辺の水田に約4 kmにわたって出現し、西に向かって被害の大きかった益城町の中心部まで延びる. この断 層トレースは既存の活断層図には示されていない. 一方、南側の地震断層(図4b)は活断 層線沿いに沿って西南西に延び、日奈久断層に合流する. これらの断層トレースはすべて 右横ずれ変位を伴い、地震断層帯として変位量を合算すると、最大2.5mの右横ずれとなる.

益城町堂園から東に位置する西原村でも、概ね既知の布田川断層沿いに明瞭な右横ずれ 断層変位を確認した.ただし、益城町側ほど連続性は良くなく、断続的に分布する区間も ある.西原村では、地震断層は農業用の大切畑ダムの堤体を横切る.大切畑地区〜桑鶴地 区一帯では、最大約1.7メートルの右横ずれ変位を確認した(図4c).地震断層はさらに西 原村を抜け南阿蘇村へ連続する.この部分は渡辺ほか(1978)や活断層研究会(1991)に よって向山断層と記されていた部分にあたる.地震断層は外輪山を構成する第四紀火山岩 類を切り、鞍部列などの断層変位地形沿いに現れた(図4d).南阿蘇村立野地区では、断 層は南阿蘇鉄道のレールを横切り、カルデラ内に延びる.立野ダム放水路建設予定地の白 川沿いにはほぼ90度で直立する断層面が露出しており、今回の地震時の右横ずれ変位によ って、肌色を呈す断層面が新たに露出した(図4c).断層面の走向はN55°Eを示し、地 震時右横ずれ変位量は 1.3-1.4m である.明瞭な断層粘土はフィルム状を呈し,南側の堅硬 な安山岩溶岩に対し,断層の北側はカタクレーサイト(粉砕岩)から構成される.



図4 布田川断層沿いに出現した地震断層. a) 右横ずれ最大変位量 2.2m を計測した益城 町堂園地区, b) 右横ずれによって民家が道路を塞いだ益城町三竹地区, c) 右横ずれ 1.65m を示す西原村桑鶴地区, d) 南阿蘇村立野地区白川左岸の逆向き地震断層崖. 最大 1.8m の 右横ずれを伴う, e) 立野地区白川右岸の断層露頭. 鉛直にそそり立つ壁面が断層面. 肌色 の部分が, 平成 28 年熊本地震で新たに露出した部分. f) 南阿蘇村阿蘇大橋の 200m 東に 出現した地震断層.

3.1.2 阿蘇カルデラ内の地震断層

地震断層は南阿蘇村立野地区から黒川を隔てて北東に連続する.斜面崩壊によって落橋 した阿蘇大橋の向かいの水田にも,約1メートルの右横ずれを示す地震断層を確認した(図 4f).この地震断層は北東に向かって被害の大きかった黒川地区の集落内にまで延びる.その後,北にステップして,東海大学阿蘇校舎,阿蘇ファームランド内を横切り,南阿蘇村と阿蘇市の境界付近まで延びることを確認した.今回の地震断層トレースは,「新編日本の活断層」(活断層研究会,1991)をはじめ既存の活断層図に示されていないものである.火山活動による地形改変のために,断層変位地形の保存が悪かったものと考えられる.

3.1.3 日奈久断層沿いの地震断層



図5 日奈久断層沿いに出現した地震断層.a)御船町高木地区,b) 畝を横切って出現した地震断層(御船町小坂地区),c) 地震断層帯南端付近でわずかに右横ずれを伴う(御船町 平成音楽大学の西北西約 400m)

布田川断層から続く地震断層は、南西に向かって日奈久断層上へ連続する(図1).活断 層図に示された両断層の接合部はシャープな「くの字」ではなく、円弧を描いて連続する. また、接合部から北西へも布田川断層の延長が約2.5km連続するが、これらの変位は概ね 20 cm以下である.

日奈久断層上の地震断層は,布田川断層と同様に右横ずれを示す.布田川断層に比べて 変位量は小さく,御船町高木地区で最大約 70 cm である.地震断層を確認した約5キロメ ートルの区間ではきわめて連続性が良く,並走や分岐はみられず,上下変位はほとんど観 察されない(図5a,b).変位量は南西に向かって少しずつ減少し,御舟町小坂ではわずか 25 cm 程度にまで減少する(図5c).地震断層の南端は甲佐町の緑川右岸付近である.

3.1.4 出ノロ断層沿いの地表地震断層(布田~立野地区西原)

熊本地震では、右横ずれ変位を示す地震断層(布田川断層)に並走して、正断層変位に よる新鮮な断層崖が出現した.この正断層は地震断層帯中央部の西原村内に分布する.川 原地区(図6d)を西端とし、俵山の北麓を通り、阿蘇外輪山カルデラ壁近傍に続く.断続 的ではあるが、総延長は約10キロメートルに達する.主として北西側が沈降する動きを示 し、上下変位量は最大で約2メートルに達する.露出が顕著な地点は俵山北麓の小森牧野 で、斜面中腹には1メートル前後の比高を示す新鮮な断層崖が出現した(図6a, b).崖に は茶褐色を呈するクロボクや火山灰層が露出し、周囲の緑の牧草地とのコントラストが明 瞭で、約2km離れた県道28号から目視で確認できた.

この正断層帯は、変動地形から判読されていた既知の出ノロ断層(いでのくちだんそう、 九州活構造研究会、1989)に、概ね沿って出現した.地震断層を隔てて、牧草地斜面低下 側(北側)は約10メートル以上下がっており、累積断層変位が確認できる(図6a).

地震断層ではなく地すべりによる滑落崖の可能性も考えられるが、1) 崖の直線性、2) 地すべりブロックの先端を示す地形の不在、3) 斜面低下側(北西側)が隆起する共役の 正断層(antithetic fault)の存在(図7)から、表層の地すべりではなくテクトニック(造 構運動)な活断層であると判断できる.

30



図6 出ノロ断層沿いに出現した地震断層.a)b)西原村小森牧野.約1m前後の北落ちの上下変位を伴う.累積上下変位も認められる.c)西原村俵山北西麓の森林に出現した地 震断層.断層沿いに倒木や斜面崩壊が多数見られる.d)正断層タイプの地震断層南西端付近(西原村川原地区).



図7 西原村小森牧野に出現した出ノロ断層と共役の南落の正断層

#### 3.1.5 熊本市街地に延びる地震断層

熊本市街地でも、東区健軍から白川までの長さ約 5.4km にわたり、北西走向に開口亀裂 が断続的に発達する(図1).この地表変状帯は、低断層崖と考えられる南西側下がりの崖 地形(Goto et al., 2017)に沿って連続する.同センスの最大 10 cm の上下変位も確認され た.これらの小規模な地表変状帯は、干渉 SAR 解析にみられる北西走向の複数の干渉縞不 連続(国土地理院,2016; Fujiwara,2016)にほぼ一致する.この地表変状帯に沿って、 5km 以浅を震源とする余震活動がこの地震断層帯に沿って集中するが、大規模な余震は含 まれていない.近傍の住民は、4月 16 日早朝に地変を確認している.このことから、この 地表変状帯も本震時に現れた地震断層と解釈した.

#### 3.1.6 阿蘇市 JR 宮地駅周辺の地震断層

阿蘇カルデラ内北東部でも約2kmの地震断層を確認した. 阿蘇カルデラ内北東の阿蘇市 JR 宮地駅周辺では,北東走向に長さ約2kmの区間で最大上下変位10cm程度,右横ずれ 変位約5cmの地震断層が認められる(図8). この小規模な地震断層は,干渉SAR解析(国 土地理院,2016)の干渉縞の食い違いとして検出されたもので,5月上旬の現地調査で確 認した.本震地震断層帯の北東延長方向に位置するものの,距離は約12km離れている(図 1). 阿蘇市宮地地区周辺では,4月16日本震以外にも同日3時3分に最大震度5強を記 録するM5.9地震が発生している.この地震の震源の深さは6.9kmと顕著に浅いことから, 同地震時に生じた地震断層と考えられる.



図8 阿蘇市 JR 宮地駅付近に出現した最大余震に伴うと考えられる地震断層.a) アパートの駐車場アスファルトの約10cmの段差,b) 墓地擁壁の5cm 弱の右横ずれ変位.c) 阿蘇市古神地区の市営駐車場に現れた南落の上下変位.
#### 3.1.7 阿蘇カルデラ内黒川地域の地表変状

今回の調査によって確認された本震の地震断層北東端は南阿蘇村と阿蘇市の境界付近ま でである.その北東延長部では明瞭な地表地震断層は見出されていない.しかし,図3の 青線に示すように,カルデラ内北西部の黒川沿いには多数の地表変状が認められ,一部を 地震断層と解釈する見方もある(例えば,Lin et al., 2016).しかし我々は,現地調査と空 中写真地形判読から,これらの変状を地震動に伴う液状化や表層地盤の側方移動と判断し た(石村・遠田,2016).その後の他機関の調査・研究でもテクトニックな変形ではないこ とが確かめられている(例えば,向山ほか,2016;Tsuji et al., 2017).



図9 阿蘇カルデラ内の北西部〜北部にみられる液状化や地盤の側方移動に伴う開口亀裂 や上下変位.a)カルデラ内北部黒川沿いに認められる噴砂跡.b)c)阿蘇市内牧地区の表 層地盤の側方移動に伴う上下変位.d)阿蘇市宮山地区の黒川左岸に認められる地表変状.

液状化にともなう噴砂の分布はカルデラ北部の低地部の広い範囲で認められる(図9a). 一方でカルデラの南部では、液状化と噴砂はほとんど確認されない.この差異の要因を明 らかにするために国土地理院によって撮影された空中写真(4月16日撮影)を用いて、写 真判読を行い、一部現地でも状況を確認した.カルデラ北部の液状化と噴砂は側方移動を 伴うものと伴わないものに大きく分けられる.側方移動を伴うものは旧河道に沿って分布 しているものも見られる.さらに干渉 SAR 画像(国土地理院,2016)との比較を行ったと ころ液状化・噴砂分布との対応が認められた.ただし,阿蘇市的石や内牧では地表変状の 規模が大きく,長さは2km以上,主に北落ちの上下変位が最大2m近く認められた(図9 b,c).内牧に認められる同心円状の沈降もしくは水平移動(ブロック)の南北縁には液状 化と噴砂が集中している.この大規模な地盤の沈降(もしくは移動)現象と関連が示唆さ れる.また干渉 SAR 画像で不干渉領域と液状化・噴砂分布の一致や局所的な変形(阿蘇市 的石,下田代,広瀬)と側方流動の一致が確認できる.

空中写真においてカルデラ北部西方において赤色,それ以外の地点では灰色を呈する噴砂と思われる現象が認められた.現地調査の結果,それぞれの場所で赤褐色を呈する層厚1cm ほどの泥と灰色を呈する細粒砂が確認された.特に旧河道沿いでは高さ 10~20cm に達する砂火山が確認された(図9a).また,調査時点で噴砂からの湧水が認められる地点もあった.

3.2 議論およびまとめ

#### 3.2.1 熊本地震の地表地震断層の特長

平成 28 年熊本地震の地震断層は、分布形態の観点から、1)横ずれ断層の地表雁行配列 とその階層性、2)並走する横ずれ断層と正断層によるスリップパーティショニング、3) 主地震断層帯から 10km 以上遠方にまで及ぶ多数の誘発性の断層変位、の3つの特徴を有 する.以下に、それぞれの特長をまとめる.

1) 横ずれ断層の地表配列とその階層性

熊本地震の地表地震断層の特徴は、断層トレースの杉型雁行配列(left-stepping en echelon faults)である.右横ずれに伴う典型的な配列であるが、数 m から数 km オーダー まで段階的・階層的に生じている点が重要である(図 10a).メートルオーダーでは、モー ルトラック(mole track)と裂け目(fissure)を数mの波長で繰り返すなどの特徴がみら れる(図 10b).100mオーダーの左ステップ(left-stepping)の典型は、阿蘇大橋河陽付近 の地震断層と黒川対岸の立野の地震断層との関係で、両者間には幅 150m のステップがあ る(図 10c).被害の大きかった河陽-黒川地区はこの圧縮ステップ場にあり、地すべりでは 説明できない多数の地表断裂が観察される.このような様々なスケールでの杉型配列は、 表層付近の被覆層(表土など)や非溶結の火砕流堆積物の層厚、地殻極浅部の強度不均質 などが影響していると考えられる.熊本地震の地震断層に見られるステップ構造と変形帯 の観察結果は、同様の横ずれ断層の断層変位ハザードや断層破壊過程、強震動予測に重要 な示唆を与える.



図 10 地震断層の階層状杉雁行配列.a)西原村大切畑地区の駐車場に現れた地震断層.2 階層の杉型雁行配列が観察される(右上模式図).b)雁行配列にともなう小上下変動.モ ールトラック(mole track)と裂け目(fissure)の繰り返しが認められる(益城町堂園地 区).c)数 100m オーダーの右ステップ構造.立野地区では断層トレースの左ステップに ともなう150m 幅のギャップが認められる.この構造は黒川の屈曲と対応する.

#### 2) 正断層とスリップパーティショニング

今回の地震断層のもう1つの特徴は、横ずれ断層(布田川断層)と北落ちの正断層(出 ノロ断層)が約 10km にわたって並走することである. 正断層は、一部は既知の出ノロ断 層に沿って出現し(図1b)、横ずれ断層との離隔距離は最大で2km である. 正断層の上下 変位は概ね数 10cm~1m 強で横ずれ断層とほぼ同等の変位量を有す(最大で2m). 熊本地 震の震源断層は、余震分布・干渉 SAR 解析等から北に 60°前後で傾斜し、顕著な正断層成 分を伴って斜めずれしていると指摘されている(例えば、Kubo et al., 2016). このことか ら、地下深部での斜めすべりが、地表で横ずれと縦ずれに分担されるスリップパーティシ ョニング(slip partitioning)現象が生じたと推定される(Toda et al., 2016). 布田川断層 が正断層成分を持つことは、同断層の東北東走向と別府-島原地溝帯の南縁に位置すること と整合的である. 当区間では浅部の余震が少なく、余震発生にも影響を与えている可能性 がある. 海外の地震では報告例があったが(King et al., 2005)、国内ではおそらく初めて の事例と思われる. 縦ずれ断層と横ずれ断層が数 km 以内に位置する例は、四国~和歌山の 中央構造線活断層帯や,琵琶湖西岸断層帯と花折断層帯など国内に複数例がある. 今回の スリップパーティションを理解することは、地表の断層分布から地下の震源を適確に把握 し、地震規模や破壊域を推定するうえで、きわめて重要である.



図 11 右横ずれ断層(布田川断層)と正断層(出ノロ断層)の並走区間.a) 干渉 SAR 解 析図(国土地理院,2016)と地震断層分布.b) 両断層沿いの地震断層の詳細分布と地形.



図 12 熊本地震で発生したスリップパーティショニングの模式概念図

3) 副断層, 誘発断層変位, 余震時に現れた地震断層

熊本地震では、主地震断層帯から 10km 以上遠方にまで多数の地表断層変位が確認された. 衛星からの干渉 SAR 解析によって面的に地殻変動が捉えられるようになったために、 検出が可能になったものである. このような主断層帯外の小変位は 200 個所以上にのぼる と指摘されている (Fujiwara et al., 2016).

これらの地表地震断層は、地震活動を伴う地表変位と地震活動を伴わない地表変位に分けられる.前述の阿蘇カルデラ北東部のJR 宮地駅周辺の地震断層は、阿蘇カルデラ中央火口丘を隔てて、本震震源から約 12km 北東に位置しており、約 1.5 時間後に発生した M5.9 余震によるものである可能性が高い.一方、熊本市街地を北西走向に約 5.4km 延びる地震断層は本震時に出現したと考えられるが、小余震を多数伴う.さらに、阿蘇外輪山西部にも多数の東西走向の干渉縞の不連続が認められ (Fujiwara et al., 2016)、国土地理院によって最大 40cm 程度の上下変位が確認されている.

副断層や遠地誘発断層の変位データは,主断層沿いの断層変位と比較するとデータの数 が少ない.過去の地震断層分布図には副断層が数多く見落とされている可能性がある.測 地技術の発達によって,このような副断層や小変位が見出されるようになり,地震断層の 複雑な分布傾向が明らかになりつつある.今後継続的に高精度のデータの蓄積することに よって,より詳細で信頼度の高い断層変位ハザード評価が可能になるものと思われる.

3.2.2 地表断層変位による構造物被害

近傍の活断層に対して重要構造物の安全性を担保するためには、地震動だけではなく断

層変位への十分な対応が迫られる.そのためには、地震時の断層出現位置と変位量を予め 把握し、断層を回避するか工学的対策をたてることが重要となる.

熊本地震では、地震動による建物倒壊だけではなく、地震断層変位による道路や橋、住 宅など構造物の被害を多数確認した(図13).一般住宅の被害は、益城町中心部、益城町南 部の木山川左岸の集落沿い、益城町東部の布田川沿い、西原村大切畑地区、南阿蘇村河陽 地区・黒川地区で目立った.断層変位は横ずれが主体であったため、断層の真上に位置す る家屋の横ずれ剪断破壊や歪みが主であるが(図13a, b)、同時に数十 cm の上下変位によ って損壊した木造家屋や納屋も認められた(図13c).南阿蘇村では、断層変位による学生 アパートの歪みや傾動、大規模損壊などが目立った(図13i·l).ただし、地震動による損壊 との分離は困難で、地震動と断層変位の相乗効果による影響も考えられる.

ダムや送電鉄塔,橋梁,トンネルなども大規模構造物の被害も認められた.西原村では, 地震断層は農業用の大切畑ダムの堤体を横切り,ダム堤体(堤体上の県道28号線)を約1.5 メートル右横ずれさせた(図13d).また,地震断層は近傍の百万ボルト鉄塔の基礎を直撃 した.鉄塔中央部の歪みの原因になった可能性がある(図13f).さらに,桑鶴地区の桑鶴 大橋も直下を地震断層が通過し,橋脚付け根の右横ずれによる被害を受けた(図13e).

今回の地震断層の出現位置と変位量は,事前にどの程度予測できたのか.地震断層全域 を A41ページに納める程度に縮小表示すると(図1),阿蘇カルデラ内の断層と益城町中 心部へ延びる断層線を除き,ほぼ活断層の位置と地震断層は一致する.しかし,1:25,000 スケールの地形図まで拡大すると,出現位置は既存の活断層トレースに必ずしも沿うもの ではない(図14).断層の分岐や雁行配列,走向の変化にともなう位置のずれが目立つ.し たがって,一部の明瞭な断層変位地形の部分を除いて,ピンポイントでの予測は困難であ る.ただし,山間部の現地踏査では,1:25,000地形図に表れない断層変位地形を地震断層 沿いに読み取ることができる.航空レーザー計測等による精密な地形データの取得によっ て,詳細な活断層の抽出と位置精度の向上が期待できる.また,ハザードの提示・注意喚 起にあたっては,単一断層線ではなく断層帯として幅を持たせた表示法も考えられる.

39



図13 地震断層による構造物の被害.a)日奈久断層の約50cmの右横ずれ変位による建物 壁とブロック塀の歪み(御舟町高木地区),b)右横ずれ変位で生じたガレージの歪みと基 礎の破壊(益城町三竹地区),c)地震断層崖直上の倒壊した木造の納屋(西原村日向地区), d)地震断層が堤体を横切った大切畑ダム(西原村大切畑地区),e)1.5m 右横ずれした大 切畑ダム堤体上の県道28号線(西原村大切畑地区),f)地震断層によって基礎が傾き鉄塔 中央部に歪みが生じた送電線鉄塔(西原村大切畑地区)



図13(続き) g)橋梁接合部にみられる右横ずれ変位(桑鶴大橋,西原村桑鶴地区),h) 地震断層の右横ずれ変位によって変形した南阿蘇鉄道のレール(西原村立野地区).道路の ような人工構造物は断層で明瞭に変位するが,レールは右横ずれ運動によって1メートル 強曲げられ,その反動で全体としてはS字状に変形していた. i)基礎が右横ずれ変位し歪 んだ学生アパート(南阿蘇村黒川地区),j)基礎が右横ずれ変位し歪んだ学生アパート(南 阿蘇村河陽地区),k)地震断層変位によって傾いた学生アパート(南阿蘇村黒川地区).1 階部分が潰れている.l)横ずれ地震断層の近傍の地表変状(副断層と推定される)によっ て1階部分が潰れた3階建てアパート(南阿蘇村黒川地区).



図 14 布田川断層西部の活断層(緑線,池田ほか,2001)と平成 28 年熊本地震で現れた 地震断層(赤線)との比較.

<参考文献>

- 1) 国土地理院,平成 28 年熊本地震に関する情報,2016, http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html
- 2) Fujiwara, S., H. Yarai, T. Kobayashi, Y. Morishita, T. Nakano, B. Miyahara, H. Nakai, Y. Miura, H. Ueshiba, Y. Kakiage and H. Une, Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry, Earth, Planets and Space, 68, 160, 2016.
- 3) Goto, H., H. Tsutsumi, S. Toda, and Y. Kumahara, Geomorphic features of surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake in and around the downtown of Kumamoto City, and implications on triggered slip along active faults, Earth, Planets and Space, 69, 26, 2017.
- 2001、1:25,000
  4)池田安隆・千田 昇・中田 高・金田平太郎・田力正好・高沢信司、2001、1:25,000
  都市圏活断層図「熊本」、国土地理院技術資料 D・1-No.388.
- 5) 石村大輔・遠田晋次, 阿蘇カルデラ内に認められる 2016 年熊本地震に伴う液状化と噴砂の分布, 2016 年5月 25日, 日本地球惑星科学連合連合大会 2016 年大会講演要旨,

2016.

- 6) 活断層研究会編,「新編 日本の活断層-分布図と資料-」,東京大学出版会,437p, 1991.
- King G, Klinger Y, Bowman D, Tapponnier P, Slip-partitioned surface breaks for the Mw 7.8 2001 Kokoxili earthquake, China. Bull Seismol Soc Amer 95, 731-738, 2005.
- Kubo, H., W. Suzuki, S. Aoi, and H. Sekiguchi, Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from strong-motion waveforms, Earth, Planets and Space, 68, 161, 2016.
- 9) 熊原 康博,後藤 秀昭,中田高,石黒 聡士,石村 大輔,石山 達也,岡田 真介,楮 原 京子,柏原 真太郎,金田 平太郎,杉戸 信彦,鈴木 康弘,竹並 大士,田中 圭,田 中 知季,堤 浩之,遠田 晋次,廣内 大助,松多 信尚,箕田 友和,森木 ひかる,吉田 春香,渡辺 満久,2016 年熊本地震に伴う地表地震断層の分布とその特徴,2016 年5月 25 日,日本地球惑星科学連合連合大会 2016 年大会講演要旨,2016.
- 10) 九州活構造研究会編,「九州の活構造」,東京大学出版会,553p,1989.
- 11) Lin, A., T. Satsukawa, M. Wang, Z. Mohammadi Asl, R. Fueta, and F. Nakajima, Coseismic rupturing stopped by Aso volcano during the 2016 Mw 7.1 Kumamoto earthquake, Japan, Science, doi:10.1126/science.aah4629, 2016.
- 12) 向山 栄・佐藤 匠・本間信一・山口恭子,2016,数値地形画像マッチングによる平 成28年熊本地震における地表変動解析,日本応用地質学会,平成28年研究発表会講演 論文集,1-2.
- 13)中田 高・岡田篤正・千田 昇・金田平太郎・田力正好・高沢信司, 1:25,000都市
  圏活断層図「八代」,国土地理院技術資料 D・1-No.388, 2001.
- 14) 中田 高・今泉俊文編, 活断層詳細デジタルマップ. 東京大学出版会, 60pp+DVD-ROM2 枚, 2002.
- 15) Toda, S., H. Kaneda, S. Okada, D. Ishimura, and Z. Mildon, Slip-partitioned surface ruptures for the Mw 7.0 16 April 2016 Kumamoto, Japan, earthquake, Earth, Planets and Space, 68, 188, 2016.
- 16) Tsuji, T., J. Ishibashi, K. Ishitsuka, and R. Kamata, Horizontal sliding of kilometre-scale hot spring area during the 2016 Kumamoto earthquake, Scientific report, 7, article number: 42947, doi:10.1038/srep42947, 2017.
- 17) 渡辺一徳・籾倉克幹・鶴田孝三, 阿蘇カルデラ西麓の活断層群と側火口の位置, 第四 紀研究, 18, 89-101, 1978.

<謝辞>

調査にあたっては、文部科学省特別研究促進費(研究課題:2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査(代表:九州大学:清水洋教授))のもとに実施した広島大学・千葉大学・ 東京大学地震研究所・京都大学などとの熊本地震地震断層大学調査グループ(熊原康博・ 後藤秀昭・中田高・石黒聡士・石山達也・楮原京子・柏原真太郎・金田平太郎・杉戸信彦・ 鈴木康弘・竹竝大士・田中圭・田中知季・堤浩之・遠田晋次・廣内大助・松多信尚・箕田 友和・森木ひかる・吉田春香・渡辺満久)の方々と情報とデータを共有した.また, JSPS プログラムで来日中のロンドン大学 Zoe Mildon さんには現地調査でのマッピングや変位計 測を手伝っていただいた.記してお礼申し上げます.

# 第4章 木造建物の被害

## 柴山明寛(東北大学災害科学国際研究所災害アーカイブ分野)

ここでは、平成 28 年熊本地震に伴う木造建物被害の簡易悉皆調査した結果を報告する. 調査は、平成 28 年 4 月 23 日(土) ~ 4 月 24 日(日)の期間で強震観測点周辺の建物被 害調査を実施した.本報告では、4 月 24 日(日)午前に阿蘇郡南阿蘇村の木造建物の被害 調査の結果のみについて報告する.

## 4.1 現地調査について

調査の対象とした地域は、阿蘇郡南阿蘇村の河陽地区及び黒川地区の木造建物の被害を 中心に調査を実施した.調査地域を図 1 に示す.調査地域の選定は、報道等で被害が集中 している報道がされたこと、地表面に断層が出現していることなどを理由に調査を実施し た.調査時は、小雨の降る中で実施したが、本震から 1 週間程度しか経っておらず、余震 による二次災害の危険性及び土砂災害の危険性が少なからずあったことから、安全を見て 道路からの外観目視と写真撮影による調査とした.後述で示す被害判定結果については、 建物に近づけなかったことから、あくまで参考程度の被害判定結果であり、自治体が実施 している罹災証明のため被災建物調査と異なる場合があることを記載しておく.



図1 国土地理院(平成28年熊本地震に伴う南阿蘇村河陽地区・黒川地区における地表の 亀裂分布図)に調査地域を加筆<sup>1)</sup>

4.2 木造建物被害調査方法及び被害判定方法について

木造建物の被災調査は、自治体が実施する応急危険度判定や罹災証明のための被災建物 調査などがある.本調査では、これらの調査方法ではなく、日本建築学会が実施している 外観目視による悉皆調査の方法を採用した.悉皆調査とは、ある一定エリアにある建物の 被害状態に関する全数調査のことであり、建物の全数を調査することで被害の全体像の把 握の目的と被害要因の解明のために行う調査である.

調査方法は,調査対象地域の建物全てに対して写真撮影を行う方法とした.これは,上 記で述べた通り,二次災害の危険性を考慮しての措置である.通常は,一つ一つの建物に 対して調査票を用いて調査を実施し,現場で被災度の判定が行われる.今回は,撮影した 写真は,後日まとめ,写真から建物の被災度判定を行うこととした.木造建物の被害度判 定には,日本建築学会の悉皆調査で用いられる岡田・高井<sup>20</sup>の木造建物の破壊パターンとし た(図2).



図2 岡田・高井2)の木造建物の破壊パターン

### 4.3 木造建物被害の判定結果

調査対象地域の 40 棟について被災度判定を行った.調査対象地域の木造建物の被災度判 定結果を表1に示す.調査対象地域に関しては、木造建物の無被害は存在せず、半数以上 が全壊・倒壊判定となった.また、倒壊棟数も14棟と調査対象地域の木造建物の約4割強 が倒壊したことになる.さらに倒壊した建物の多くは、2階建ての1階部分のみが倒壊する 被害が目立った.その他の被害傾向として,建築時期が古くなるにつれて倒壊・全壊建物 が目立つが,1981年以降に建てられた建物も数棟が倒壊又は全壊となっている.瓦屋根の 有無による被害の傾向は見られず,スレート屋根でも倒壊している建物が見られた.

次に,調査対象範囲の被災度判定の空間分布を図3に示す.建物の倒壊・全壊が集中している場所は無く,全体的に分布していることがわかる.また,倒壊・全壊建物の間に一部損壊も見られた.これは,図3の右から左に地形が緩やかに傾斜しており,切り盛りの影響などの個々の地盤条件も異なる可能性も考えられる.

被災度	Damage Grade	棟数	被災度別棟数
無被害	Nd0	0	0
一部損壊	Md1	5	12
	Md2	7	
半壊	Rd3	1	1
全壊	Gd4	2	6
	Ed4	4	
倒壞	Sd5	1	15
	Gd5-	8	
	Gd5+	6	
その他(納屋,S造等)		6	6
合計		40	40

表1 調査対象地域の木造建物の被災度判定結果



図3 調査対象地域の被災度判定の空間分布(建物が特定できないように背景地図削除)

4.4 調査対象地域の建物被害写真

以下に、調査対象地域の建物被害写真を示す.



写真1 比較的に建築年数が経っていないと思われる倒壊建物



写真2 集合住宅の倒壊建物(1階が層崩壊した建物)



写真3 集合住宅の倒壊建物(1階が RC 造壁の車庫になっており,建物がずれ,車庫部分 に落ち込んでいる建物)



写真4 断層直上で被災を受けた集合住宅

## 4.5 近年の地震災害との比較

図4に本調査対象地域の木造建物の被災度別被害,図5,図6に東日本大震災及び新潟 県中越沖地震,能登半島地震地震の震度6強地域の木造建物の建築年代別被害を示す.震 度6強の木造建物被害と今回の調査対象地域と比較した結果,倒壊・全壊の割合が50%超 える近年の地震災害は無く,今回の調査対象地域の被災度が高いことがわかる.さらに, 1995年阪神淡路大震災で最も被害が大きかった東灘区の全壊又は大破の割合の35.41%<sup>3)</sup> より高い被害率であり,近年の災害の被害より被害が格段に大きかったことがわかる.







図5 木造建物の建築年代別被害

(左:東日本大震災の震度6強地域4),右:2007年新潟県中越沖地震の震度6強地域5)



図6 木造建物の建築年代別被害

(2007年能登半島地震の震度6強地域<sup>5)</sup>)

4.6 まとめ

本報告では、阿蘇郡南阿蘇村の木造建物の被災度判定及び近年の地震災害との比較を行っ

た.南阿蘇村河陽地区・黒川地区の倒壊率は,阪神淡路大震災の東灘区の木造建物の被害 率及び近年の木造建物の被害率より格段に大きいことが言える.被災要因としては,建築 年代が古い建物(既存不適格建物)に被害が集中したこと,前震と本震の2度の大きな揺 れにより建物の損壊が拡大したこと,などが挙げられる.また,瓦屋根の被害傾向は見ら れなかったものの,土葺き瓦を使用している住宅が多く,頭が重い建物の影響で被害が拡 大したと思われる.

<参考文献>

- 平成 28 年熊本地震に関する情報,国土交通省国土地理院, http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html
- 岡田成幸,高井伸雄:地震被害調査のための建物分類と破壊パターン,日本建築学会構造 系論文報告集,第 524 号,pp.65-72,1999 年 10 月
- 3) 独立行政法人建築研究所: H7 兵庫県南部地震最終報告書, p9, http://www.kenken.go.jp/japanese/research/iisee/list/topics/hyogo/pdf/h7-hyougo-jp-a ll.pdf
- 4) 日本建築学会:2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報,日本建築学会,pp.88-92, 2011 年 8 月
- 5) 日本建築学会:2007 年能登半島地震災害調査報告 2007 年新潟県中越沖地震災害調査報告,日本建築学会,pp.218-236,2010 年 3 月

# 第5章 社会基盤と地盤・斜面の被害

森口周二(東北大学災害科学国際研究所地域安全工学研究分野)寺田賢二郎 (東北大学災害科学国際研究所地域安全工学研究分野)

ここでは、平成28年熊本地震に伴う地盤や斜面および構造物(特に橋梁)の被害について調査した結果を報告する.調査は、平成28年4月30日(土)~5月1日(日)の期間で実施したものであり、主に益城郡益城町と阿蘇郡南阿蘇村を対象地域とした.

5.1 調査対象地域について

調査の対象とした地域は、下記の3ヶ所であり、その位置を図1に示す.なお、以降の 説明では、下記3地域に分けて報告する.

- 南阿蘇村立野・河陽地区(道路・橋梁,土砂災害)
  阿蘇大橋の被害およびその周辺
- ② 南阿蘇村河陽地区(道路・橋梁,土砂災害,宅地被害) 南阿蘇橋とその周辺,宅地被害,京都大学火山研究センター周辺の表層崩壊
- 益城町(道路・橋梁,地盤変状)
  断層付近の道路・橋梁の被害,家屋被害



図1 調査地域(Google Map に加筆)

#### 5.2 南阿蘇村立野・河陽地区(道路・橋梁,土砂災害)の被害

ここでは、主に地震力によって落橋した阿蘇大橋とその周辺について調査した結果を示 す.阿蘇大橋の位置は図2に示すとおりであり、国道57号線から国道325号線への接続部 に位置する.崩壊後の周辺の様子を図3に、地震前後の阿蘇大橋の様子を図4に示す.こ れらの図は、国土地理院が公開している資料やデータに加筆して作成したものである.阿 蘇大橋は、黒川に架かる橋梁であるが、ほとんど跡形もなく落橋し、隣接する斜面で大規 模崩壊が発生していることが確認できる.図5は阿蘇大橋周辺の赤色立体図であるが、こ の図より、崩壊が発生した阿蘇大橋に隣接する斜面には、今回の崩壊部分とは別の崩壊の 形跡が確認される.これらの崩壊がいつ発生したものであるかは不明であるが、長い年月 を遡れば、過去にも崩壊が発生していたことが伺える.



図2 崩壊部分の位置(Google Map に加筆)



図3 崩壊部分の位置(国土地理院の公開資料<sup>1)</sup>のキャプチャー画像に加筆)



図4 崩壊部分の位置(国土地理院の公開資料1)に加筆)



図5 赤色立体図 (アジア航測作成の公開資料<sup>2)</sup>に加筆)

阿蘇大橋は,橋長 206m で片側 2 車線,1970 年に完成したトラスド逆ランガー桁橋である. 図6に示すように,斜面崩壊が発生した立野地区側に橋脚を 3 本有し,その他の部分は桁の下に設置されたトラスで支える構造である.大部分が落橋したが,右岸(立野地区側) と左岸で橋の一部が残っていた.図7は,右岸側に残った橋脚の写真であり,図6における 3 本の橋脚のうち,最も右岸側のものと思われる.残りの 2 本の橋脚は,現地で確認されなかったため,落橋に伴って河川へと落下したか,斜面崩壊によって発生した土砂で埋 没したものと思われる.また,図8に示すように,左岸側には桁の一部が残っていた.図 9は,左岸の橋台と桁のジョイント部の写真であるが,ジョイント部で複雑な変形の跡が 確認されない.そのため,地震動によってジョイント部で大きな損傷を受けたということ は考えにくく,右岸側に向かって引っ張りを受けて落橋したのではないかと推察される.



図6 阿蘇大橋の図面(参考文献<sup>3)</sup>に一部加筆)



図7 残った橋脚の一部(右岸:立野側)

図8 残った桁の一部(左岸:河陽側)



図9 左岸側(河陽側)の橋台と桁のジョイント部

阿蘇大橋に隣接した斜面の崩壊の他にも、周辺では多くの崩壊が発生している. 図11 ~14の写真は、図10の①~④の各箇所を撮影したものである。①は崩壊土砂に近接す る箇所であり、その様子は図11に示している.土砂が堆積していない部分にはブルーシ ートが設置されていたため、表面の詳細な様子は確認できなかったが、ブルーシートの脇 に見える亀裂の状態などから、この箇所は全体的に引張力を受けたと推察される. ①の箇 所から少し離れた②の個所では、片側2車線で崩壊が発生していた.この箇所の様子は図 12に示す.この部分の亀裂は盛り上がるように発生しており、この箇所では圧縮力が作 用したものと思われる.この亀裂の他にも、この近辺には圧縮を受けたと考えられる形跡 がいくつか見られたため、②の箇所の路肩崩壊は、水平方向に圧縮されることによって可 能性が高い.③の箇所は、黒川を挟んで対岸(左岸)であり、その箇所の様子は図13に 示している。この箇所でも多くの崩壊が発生しており、落下寸前の車両や建物の一部に滑 落崖がかかっているなどの状況も確認された.また、崩壊せずに残った部分でも、大きな 亀裂が発生しており,河川側に向かって崩壊が発生しそうになっている状況が確認された. ④も斜面崩壊とは反対側の対岸に位置する箇所であり、③の箇所と同様の崩壊が発生して いた.この個所の様子は図14に示している。このように、阿蘇大橋周辺では、河川に向 かって多くの崩壊が発生しており、崩壊に至っていない部分でも不安定化している箇所が 数多く存在していることが確認された.なお,これらの崩壊箇所の大部分は,盛土や切土 などの人工的なのり面ではなく、地山部であると思われる.



図10 写真の撮影対象箇所(図11~14の写真に対応)





図11 撮影対象箇所①の様子



図12 撮影対象箇所②の様子



図13 撮影対象箇所③の様子



図14 撮影対象箇所④の様子

ここで、阿蘇大橋の落橋が発生した時刻について整理する.既に多くの報道で住民の証 言などが紹介されており、それらから考えて地震の最中、またはその直後に落橋したこと はほぼ間違いない.ただし、ここでは、工学的な観点から落橋の時刻を推定できる判断材 料が存在するため、そのデータを示す.阿蘇大橋は、黒川に架かっていた橋梁であるが、 黒川は阿蘇大橋の下流で白川に合流する。その白川の水位観測所(立野観測所)の地震前 後のデータが図14である.図15は、水位観測所と阿蘇大橋の位置関係を示したもので あり、水位観測所が阿蘇大橋から見て下流側にあることがわかる.河川水位は4/16の午前 1~2時の間に急激に低下している.この原因は、阿蘇大橋付近で発生した崩壊によって天 然ダムが形成され、河川が堰き止められたためと考えられる.実際に、阿蘇大橋があった 位置の下には、調査実施時点でも天然ダムの形跡が確認されている.そのため、落橋は地 震の最中、またはその直後と考えて問題ない.なお、水位低下の後に急激な水位の上昇が 確認できるが、この理由は天然ダムの許容量を超えてオーバーフローし、一気に流れ下っ たためと思われる.



図16 立野観測所と阿蘇大橋の位置関係(Google map に加筆)

次に、阿蘇大橋近辺の地盤の動きについて整理する.図17は国土地理院が作成した試 料であり、ALOS・2に搭載されている PALSAR・2のデータから作成した地盤の変動量を示 す分布図である.この図の中に、阿蘇大橋の位置を加筆している.これより、布田川断層 を境に地盤が逆方向に変動しており、布田川断層の先端に阿蘇大橋が存在していたことが 理解できる.また、図18と図19に示すように、阿蘇大橋に近い河陽地区においても断 層変位が地表面に現れていることが確認されている.この断層位置は、図20の黄色の線 で表現した位置に存在し、阿蘇大橋とかなり近い位置関係にある.ただし、この断層は図 16の中の布田川断層を延長した線から考えて少しずれた位置にある.そのため、必ずし も断言できるわけではないが、図20の断層の周辺で図17と同じような地盤変動の傾向 があったのではないかと推察される.なお、図20には、図11と図12で説明した引張 と圧縮の箇所も示している.断層の線の延長線を考えた場合、圧縮の箇所付近になるが、 断層付近で地盤が逆方向に動いたとすれば、せん断によってこの部分が局所的に圧縮を受 けたことと整合する.





図18 河陽・黒川地区の地表面亀裂1)



図19 地表面に現れた断層 6)



図20 断層の位置(Google map 航空写真に加筆)

ここまでに整理した情報に基づいて阿蘇大橋の落橋のメカニズムの説明を試みる.まず、 斜面崩壊の土砂が堆積して乗載荷重の限界を超えたことが考えられるが、この可能性は低 いと思われる.図10からわかるように、阿蘇大橋は土砂の流出範囲の中心からずれて位 置しており、崩壊土砂の大部分はそのまま白川に流れ込んでいる。阿蘇大橋の上に堆積し たとしても、それが原因となって落橋が発生するほどの大きな被害を発生させるとは考え にくい.次に,地震動によって阿蘇大橋自体が大きな被害を受けて落橋したことが考えら れる.本調査で確認した限りでは、周辺の他の橋梁でも大きな被害が発生しているものの、 落橋にまで至っている橋梁は阿蘇大橋だけであり、そのことを考えると、地震動による直 接的な落橋も可能性が低い. 最後に, 橋台を支える地盤の変状に伴って落橋が発生したと いうことが考えられるが、現段階の分析ではこの可能性が高い。先述のように、落橋は地 震に伴って発生し、阿蘇大橋の近辺では断層の運動も影響して、地盤が複雑な動きをして いる.このために、白川の両岸の崖部で多くの崩壊が発生しており、阿蘇大橋の橋台付近 の崖部が崩壊した可能性は大いにある.図21は、阿蘇大橋が存在した位置の右岸の様子 であり、黄色の点線が阿蘇大橋のあった位置を示している.図7の説明で記載したように、 橋脚が残っているが,最も右岸側のものと思われ,残りの2本の橋脚とトラス部を支える 橋台については存在しない、つまり、まずこの部分で崩壊が発生し、橋台や橋脚が落下、 それによって阿蘇大橋の落橋が発生したのではないかと考えられる。地震動により直接的 に崩壊が生じたのか、上部から流動してきた崩壊土砂が橋脚や橋台に衝突して崩壊を誘発 したのかは、どちらもその可能性が残るが、このように足下からすくわれて落橋に至った のではないかと考えられる.



図21 阿蘇大橋(右岸)の様子(国土地理院の UAV 動画<sup>1)</sup>のキャプチャー画像に加筆)

#### 5.2 南阿蘇村河陽地区(道路・橋梁,土砂災害)の被害

まず,先述の阿蘇大橋から少し離れた位置に存在する南阿蘇橋とその周辺の被害につい て報告する.南阿蘇橋の位置は図22に示すとおりであり,阿蘇山の方向から自川に流れ 込む河川に架かる橋梁である.図25に示すように,道路と橋梁のジョイント部で何かし らの変状があったようであるが,調査を実施した時点で既に応急対策が施されていた.図 23からわかるように,先述の阿蘇大橋とは異なり,落橋にまでは至っていない.ただし, 左岸側で免振ダンパーが破壊される被害が発生していた.図24に免振ダンパーの被害の 様子を示す.また,図25は,左岸下流川の緩衝装置付近の様子である.緩衝装置はゴム 製であり,そのゴムが橋台に接触した後が確認された.地震の最中に緩衝装置が機能した と考えられ,接触の痕跡から,左岸側では下流側へ移動するような動きがあったことがわ かる.

図26は南阿蘇橋周辺の航空写真である.阿蘇大橋周辺と同じく,南阿蘇橋周辺でも多 くの崩壊が発生していることがわかる.図26中に示した①の箇所(上流側)の様子は図 27に示しており,この写真から,特に上流側では多くの崩壊が発生していることが確認 できる.また,②の箇所は南阿蘇橋の下方の白川沿いに位置するキャンプ場(村営碧流キ ャンプ場)の様子であり,その様子は図28に示している.崩壊した土砂が建物やキャン プ場の敷地内に流れ込んで大きな被害が発生していることが確認できる.③の箇所は南阿 蘇橋の左岸側の崖部であり,図26からも判別できるように,大きなクラックが発生して いる.この箇所に近づいてみると,図29に示すような状況であり,クラックの幅は50cm 以上ある部分もあった.



図 2 2 南阿蘇橋の位置 (国土地理院の公開資料<sup>1)</sup>のキャプチャー画像)



図23 南阿蘇橋の写真(右岸から撮影)



図24 免振ダンパーの様子



図25 左岸下流側の緩衝材が橋台に衝突跡



図26 写真の撮影対象箇所(図27~29の写真に対応,国際航業資料に加筆)





図29 写真対象箇所③の様子

次に、南阿蘇橋から少し離れたところに位置する宅地の被害について説明する.調査対 象とした宅地の位置を図30に示す.この宅地に発生している亀裂は長く幅が大きいもの が多く、図31に示したように、航空写真からこれらの発生状況が判読可能であった.こ の亀裂発生の理由を調べることも含めて、この箇所を調査対象として選定した.図32は、 年代の異なる航空写真でこの地域の変化を示したものである.1970年代には宅地として造 成されていないが、2004年には概ね今回の地震前の状態になっている.住民の証言によれ ば、造成地として建設が終了したのが20年程度前とのことであり、1980~1990年代に造 成されたものと推察される.図33は、この地域周辺の3Dモデルのキャプキャー画像に 加筆したものである.図33からわかるように、宅地造成地に隣接して河川があることが わかる.この河川の下流に先述の南阿蘇橋が存在し、河川の両岸が図27に示したような 崖になっている.つまり、調査対象である宅地造成地は河川沿いの崖に隣接するように位 置している.このために、図34に示すように、崖部付近で河川側に向かって崩壊や地盤 変状が多数発生しており、それに伴って家屋被害が発生していた.



図30 調査対象の宅地造成地の位置



図31 宅地造成地およびその周辺の地表面亀裂(Google map に加筆)



図32 宅地およびその周辺航空写真(地理院地図航空写真1974-1978年,2004年) 8)



図33 宅地およびその周辺の様子(地理院地図3Dモデルのキャプキャー画像®に加筆)



図34 宅地造成地およびその周辺の航空写真 7)

宅地造成地の内部では、地盤変状に伴う多くの家屋被害が発生していた. その様子を図 35~38に示す.これらの図には、震災前の様子と撮影箇所の地図上での位置を示して いる.図35~37は河川沿いの崖部に隣接する家屋であり、大きな地盤変状に伴い、家 屋が傾いたり、変形したりしている.図36に示した家屋では、1階部分が押しつぶされて おり、家屋自体が大きな被害を受けているが、この宅地造成地全体でこのような被害形態 は多くはなく、地盤変状に伴う家屋の傾きや一部損壊が多く見られた。図37に示した被 害が特に特徴的であり、家屋は大きく傾いているが、家屋そのものには大きな亀裂や変形 が見られなかった.大部分がコンクリート製であり,地震動に対しては十分な強度を有し ていたと考えられるが、地盤の変状に伴って大きく傾きが生じたものと推察される、図3 7の家屋の所有する住民の証言によれば、4/16の本震の前まではほとんど被害がなく、こ の宅地造成地の被害の大部分は本震で発生したものとのことであった。図38は、河川か ら離れた位置に存在する家屋であるが、図中に示すような大きな段差を伴う亀裂が発生し ていた.この亀裂は家屋の一部を通るように発生しており,河川側とは反対側に傾きが生 じていた. なお, 証言によれば, 4/16 の本震直後には本調査時よりも大きな亀裂の段差が 発生していたとのことで、その段差が徐々に解消されるように地面が動いているように感 じられるとのことであった.なお、この家屋の周辺には、図中に示した亀裂の他に、家屋 を挟んでこの亀裂に並行するようにもう1本の亀裂が発生しており、その2本の亀裂に沿 ってその相田の家屋の部分が落ち込むような地盤変状が発生していた.

この宅地全体を踏査した結果,河川側とその反対側で大きな地盤変状が発生しているが, その間の一部の範囲では大きな地盤変状が発生しておらず,家屋被害も小さい範囲がある ことがわかった.この理由は次のように考えられる.図39は宅地造成地の等高線図であ るが,崖部の手前の宅地部分が最も高くなっていることがわかる.このため,図40と図 41に示すように,高くなっている部分を境にして,河川側とその反対側へ地盤の変状が 発生しているのではないかと推察される.このため,その中間に位置する部分では,大き な変位が発生せず,被害が小さくなったものと思われる.これを裏付けるものとして,図 42を示した.図42は,この宅地の本震前後の航空写真を重ねたものであり,中央には 道路のズレが確認できるが,この結果からも宅地の河川側とその反対側で異なる動きをし ていることが確認できる.

ここまでに説明した状況から考えて、この宅地(特に河川側)では地盤が非常に不安定 な状態にあると推察される.今後の梅雨や台風時期には、不安定化がさらに進む可能性が あり、対策が望まれる.ただし、図41に示したように、不安定化している領域がかなり 広範囲に及んでいると考えられ、抜本的な対策は非常に難しいのも事実である.詳細な調 査を実施した上で、時間をかけてでも適切な対策を講じる必要がある.



図35 地盤変状と家屋被害(その1)(Google map に加筆)



図36 地盤変状と家屋被害(その2)(Google map に加筆)



図37 地盤変状と家屋被害(その3)(Google map に加筆)



図38 地盤変状と家屋被害(その4)(Google map に加筆)


図39 等高線図(国土地理院資料<sup>1)</sup>に加筆) 図40 地盤の動き(Googlemap に加筆)



図41 地盤の動き(地理院地図3Dモデルのキャプキャー画像®に加筆)



図42 地震前後の道路のズレ(国土地理院資料<sup>1)</sup>に加筆)

次に、阿蘇大橋の東側に位置する京都大学火山研究所周辺(高野台地区)の大規模斜面 崩壊について報告する.図43は崩壊箇所の位置を示しており、図44はその周辺の航空 写真を示したものである.図45は地震前後を比較したものであり、黄色の線は崩壊土砂 の流出範囲を示している.図45に示したように、最も大きな崩壊は火山研究所から見て 南西の方向で発生しており、3方向に土砂が流出していることが確認できる.非常に緩勾配 な斜面でありながら、流出距離は非常に長いのが特的であり、3方向に流出したうちの1方 向で家屋が土砂に巻き込まれる被害が発生している.図46~49は、崩壊箇所内部の様 子と家屋被害の写真である.基盤となる岩盤層が崩壊したのではなく、火山灰土と黒ぼく で構成される表層が動いたものであり、崩壊形態は表層崩壊に部類されるが、規模が大き いため、内部では非常に大きな変状が発生している.火山研究所を頂上として、小高い丘 になっており、溶岩ドームの表面に火山灰土が堆積して形成されたものと推察される.

図50は、南阿蘇村河陽の土砂災害と地盤変状の発生個所を示している.既に、国土地 理院<sup>1)</sup>や地盤工学会<sup>9)</sup>からも報告されているが、この地域では非常に多くの土砂災害や地 盤変状が発生している.今後の梅雨や台風の時期には、降雨による地下水の上昇に伴う地 盤の更なる不安定化や土砂災害の発生のリスクが高まると思われるが、全ての箇所に対す る対策にはかなりの時間を要すると思われる.今後の被害を最小限にとどめるためには、 行政の努力だけでなく、降雨時の早期避難などの住民レベルの対応が極めて重要になると 考えられる.



図43 崩壊箇所の位置(Google map に加筆)



図44 崩壊箇所およびその周辺の航空写真 7)



図45 地震前後の比較(国土地理院資料<sup>1)</sup>に加筆)





図46 崩壊箇所内部の様子

図47 崩壊箇所内部の土



図48 崩壊箇所内部の道路の段差



図49 崩壊土砂による家屋被害



図50 南阿蘇村の土砂災害と地盤変状の発生個所(Google map 衛星写真から判読)

## 5.3 益城町(道路・橋梁,地盤変状)の被害

今回の地震で甚大な被害が発生した益城町についても、橋梁の被害を中心に調査を行った。特に布田川断層に近い被害の大きかった地域について調査を行っており、主な調査対象箇所は図51に示すとおりである。調査では、図51に示す範囲以外も確認しているが、被害は断層沿いに集中しており、断層からの距離と被害の大きさに強い関係があることが伺えた。

図52と図53に示した木山橋と畑中橋では、一部損傷が確認されたものの、大きな被 害には至っておらず、調査時点で通行止めなどにはなっていなかった.図54と図55に 示した新木山橋と第一畑中橋は、隣接して存在するが、被害の程度に大きな差が確認され た.どちらの橋梁も、堤防の変状により、堤防と橋梁の接続部で大きな段差が生じている. 新木山橋については、アスファルトのオーバーレイによる応急対策が施され、調査時点で 通行が可能となっていた.これに対して、第一畑中橋は、特に応急対策は施されずに通行 止めになっていた.第一畑中橋は図55に示すように、橋脚が損傷しており、非常に危険 な状態であり、簡易的な応急対策による復旧は難しいためにこのような措置がとられてい るものと推察される.図56の第二畑中橋でも堤防と橋梁の接続部で段差が発生したと思 われるが、砂を敷くことによって応急的な手当てがされており、走行可能な状態であった.

図57に示したのは第一畑中橋と第二畑中橋の間の堤防の様子を撮影したものであり, トラックの割合が多く,渋滞が発生していた.これは,図58に示した震災ゴミ集積場へ と続いた渋滞である.この近辺にある益城町総合体育館は避難所になっており,震災ゴミ 集積場も近くにあることから,多くの人が集中してアクセスする状態になっていた.その 意味で周辺の橋梁は重要なアクセス網の一部になっている.これらの橋梁は第一畑中橋を 除いて調査時点で既に応急対策が施されていたものの,地震直後には通行が困難であった と推察される.震災後の早期復旧を考える上で,重要拠点の周辺の橋梁の耐震化は重要な 課題である.ただし,今回の被害形態を考えると,橋梁自体の被害よりも,堤防の変状に 伴って発生した被害が特徴的であり,そのような被害形態に対する事前の対策についても 考えることが課題として挙げられる.

最後に、橋梁に関するものではないが、家屋被害が特に甚大であった範囲についても報告しておく.図51に示した範囲では、いたるところで家屋被害が発生していたが、その中でも特に被害が大きかった範囲があった。図51の調査対象箇所⑧の範囲であり、その様子は図59に示している。この範囲では、地震動による直接的な家屋被害と、地盤変状による家屋被害が重なって被害が甚大になっていると推察される。大きな地盤変状が発生した理由について調べるために、図60に示すように土地利用の変遷をたどってみたが、現状の分析では、その理由について明確な説明ができるまでには至っていない。



図51 益城町の調査対象箇所(Google map に加筆)



図52 木山橋(撮影対象箇所①)



図53 畑中橋(撮影対象箇所2)



図54 新木山橋(撮影対象箇所③)



図55 第一畑中橋(撮影対象箇所④)



図56 第二畑中橋(撮影対象箇所⑤)





図57 堤防沿いの道路(撮影対象箇所⑥) 図58 震災ゴミ集積場(撮影対象箇所⑦)



図59 特に建物被害が甚大な範囲の様子(撮影対象箇所⑧)



図60 航空写真による土地利用形態の変遷の確認 10)

5.4 まとめと提言

本報告で示した調査結果に限定して考察すれば、断層の動きや地震動による直接的な被 害だけではなく、それに伴って発生する地盤変状による構造物や建物の被害が顕著である ことがわかる。構造物や建物に耐震対策が施されていても、それを支える地盤に変状が発 生すればやはり大きな被害につながる。地盤と地上構造物を一体と考える耐震対策に関す る研究はこれまでにも様々に展開されているが、実際の防災対策を考慮して、実用的な研 究をさらに加速化させる必要がある。また、断層運動に伴う表層地盤の変状を予測する評 価手法は十分に研究が進んでおらず、これを可能とする手法の確立も大きな課題として考 えられる。

なお、本報告は地震直後の一部の構造物,地盤,斜面について、その被害の調査結果に 基づいているが,被害の全容を把握するには他の資料例えば11)についても参考にしながら より詳細な検討が必要であることを申し添えておく。

<参考文献>

- 平成 28 年熊本地震に関する情報,国土交通省国土地理院, http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamoto-earthquake-index.html
- 2) 「平成 28 年熊本地震」災害状況(2016 年 4 月),アジア航測株式会社, http://www.ajiko.co.jp/article/detail/ID56EDF7EZH/
- 3) 熊本県下における近代橋梁の発展史に関する研究, 戸塚誠司, 熊本大学, 1999.

4) 河川の防災情報,国土交通省, http://www.river.go.jp/kawabou/ipSuiiKobetu.do?obsrvId=2282500400026&gamenId =01-1003&stgGrpKind=survOnly&fldCtlParty=no&fvrt=yes&timeType=10

- 5) 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震に伴う断層近傍の地殻変動,国土地理院, http://www.gsi.go.jp/common/000140142.png
- 6) 熊本地震による地表地震断層調査,遠田晋次・岡田真介・石村大輔,平成28年(2016年) 熊本地震に関する調査報告会(第4階), http://irides.tohoku.ac.jp/event/2016kumamotoeq.html
- 7) 【速報】平成 28 年(2016 年)熊本地震 2016 年 4 月,国際航業, http://www.kkc.co.jp/service/bousai/csr/disaster/201604\_kumamoto/
- 8) 地理院地図, 国土地理院, http://cyberjapandata.gsi.go.jp/3d/browse.html
- 9) 熊本地震調査結果報告,地盤工学会, https://www.jiban.or.jp/index.php?option=com\_content&view=article&id=1845:2016
   -4-14-kumamotojishin-top&catid=52:2008-09-15-02-30-46&Itemid=29
- 10) 国土地理院地図・航空写真閲覧サービス, http://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1
- Reconnaissance report on geotechnical damage caused by an earthquake with JMA seismic intensity 7 twice in 28 h, Kumamoto, Japan, T. Mukunoki, K. Kasama, S. Murakami, H. Ikemi, R. Ishikura, T. Fujikawa, N. Yasufuku, Y. Kitazono, Volume 56, Issue 6, December 2016, Pages 947–964

## 第6章 可能性津波の評価解析

山下 啓(東北大学災害科学国際研究所 地震津波リスク評価寄附研究部門) 今村文彦(東北大学災害科学国際研究所津波工学研究分野)

サッパシーアナワット (東北大学災害科学国際研究所津波工学研究分野)

林 晃大(東北大学災害科学国際研究所 地震津波リスク評価寄附研究部門)

菅原大助(ふじのくに地球環境史ミュージアム)

岩間俊二(株式会社 防災技術コンサルタント)

平成28年熊本地震では、地震活動が北東および南西に進展すると海域での地震が発生し 津波の懸念が生じる。そこで、今回の地震活動と過去の履歴に基づき、「6.1 熊本(天草・ 八代地方)」及び「6.2 大分・別府」を対象とした可能性津波を評価したので報告する。な お、本報告におけるポイントは以下の3点である。

- ・活断層(横ずれ)による津波の発生
- ・津波の規模と到達時間、継続時間
- ・今後の注意点の整理(施設健全性・津波避難の留意点)

6.1 熊本(天草・八代地方)を対象とした可能性津波の評価解析

熊本(天草・八代地方)における本地震活動の割れ残りは布田川-日奈久断層帯である (図 1))。そこで、布田川-日奈久断層帯の連動型地震(M7.9)を対象とした津波解析を行 なった。なお、対象とした地震は、熊本県において想定される最大クラス地震である。



図1 熊本(天草・八代地方)における様々な活断層帯 1)

6.1.1 計算条件

計算対象領域を図2に示す。ネスティング計算による空間解像度は810-270-90 m の 三段階であり、中央防災会議の公開データを利用した。また、八代海沿岸部における平均 的な朔望平均満潮位として、潮位を T.P. +2 m に設定した。そして、断層モデルとして、 表1に示す布田川-日奈久断層帯の連動型地震(M7.9)<sup>1),2)</sup>を採用して、弾性体理論<sup>3)</sup>に より地殻変動を算出する。ここで、すべり量に関して、2.5 m<sup>1)</sup>  $\rightarrow$  3.0 m<sup>2)</sup> に更新されてお り、本研究では 3m を採用した。なお、計算対象時間は地震発生後3時間である。



図 22 熊本(天草・八代地方)を対象とした計算領域

表 1	図1における布田川-	- 日奈久断層帯の連動型地震	(M7.9)	の断層モデル 1),2
-----	------------	----------------	--------	-------------

	緯度 N(°)	経度 E(゜)	深さ d (km)	走向 θ(°)	傾斜角 <i>δ</i> (゜)	すべり角 ぇ(゜)	断層長さ <i>L</i> (km)	断層幅 W(km)	すべり量 <i>U</i> (m)
⑤ 中部: 日奈久区間	32.739 324420.4	130.793 1304734.8	3	216	60	-160	52	16	2.5 <b>→3.0</b>
⑥ 南西部: 八代海区間	32.363 322146.8	1.30.473 1302822.8		236	60		32	16	2.5 → <b>3.0</b>

6.1.2 活断層(横ずれ)による津波の発生

布田川-日奈久断層帯は浅海域に位置する。このため、浅海の比較的急勾配である海底 斜面が水平移動すると、水平移動に伴う地殻の鉛直変位も有意となる(図34)。そこで、 地殻変動の水平移動成分の効果4を考慮する。図4(a)及び(b)に、それぞれ、水平移動を 考慮した場合と考慮しない場合での海底及び地表面の鉛直変位を示す。水平移動を考慮し た場合、対象とする地震は右横ズレの断層運動であるため、例えば、天草地方における山 地東側斜面では隆起、西側斜面では沈降の傾向にあることがわかる。

また、図 64(a) 及び (b) の差分、すなわち、水平移動のみによる鉛直変位を図 5 に示す。 ここで、海域における変位のみを示している。特に、複雑地形の汀線付近の海域における 水平移動に伴う鉛直変位が相対的に大きく、約 10cm の差異がみられる。



図3 地殻変動の水平移動成分の効果(Tanioka・Satake<sup>2)</sup>の図を転載)



図4 地殻変動による海底及び地表面の鉛直変位の計算値



図5 図4(a) 及び(b)の差分(地殻変動の水平移動のみによる鉛直変位)

6.1.3 可能性津波の規模に関する計算結果(最大水位・最大流速の分布)

可能性津波の規模に関する計算結果(最大水位・最大流速の分布)を報告する。図6に、 最高水位分布を示す。出水郡長島町では、最大 T.P. +2.92 m の津波高が得られた。八代海 沿岸部における防潮堤の計画天端高は概ね T.P. +2.5 ~ +5.0 m であり、想定津波高と同 程度またはそれ以上であるため、比較的安全であるものの、度重なる地震による海岸堤防 や河川堤防の機能低下によって浸水することも懸念される。

図 7(a) には、本計算条件の最大流速分布を示している。八代海と外洋とを繋ぐ狭窄部に おいて、比較的速い流れ(0.5 m/s – 1.0 m/s)が想定される。また、潮位を 0 m に設定し た場合の最大流速分布を図 7b)に示す。潮位が低い場合、潮位が高い場合(図 7a);潮位 T.P. +2 m)よりも、八代干潟や出水市の養殖場などの浅場における流速が僅かではあるが増加 することがわかる。潮位が低いことにより水深が小さくなるため、流速が大きくなるので ある。こうした浅場は沿岸生態系が豊かな水域であるため、潮位が低い場合には、沿岸生 態系に対する津波リスクが高まる。

6.1.4 可能性津波の到達時間及び継続時間に関する計算結果(水位と流速の時系列)

可能性津波の到達時間及び継続時間に関する計算結果を報告する。図 8 に、各地点にお ける水位及び流速の時系列を示す。ここで、黒線が水位を表わしており、青線が流速の絶 対値を表わしている。図の天草地方において、地震後 20 分頃に第一波ピークが到達するよ うに、波源域と陸域が近いため、陸域への津波到達は比較的早い。

また、天草・八代地方における津波の規模は比較的小さいものの、八代海が閉鎖性水域 であるため、地震発生後3時間が経過してもなお、津波が殆ど減衰しない。こうした閉鎖 性水域の津波に対しては、副振動による、津波高の増大や第二波以降での最大波出現に注 意する必要がある。



図6 熊本(天草・八代地方)を対象とした可能性津波の最高水位分布



図8 各地点における水位及び流速の時系列

6.2 大分・別府地方を対象とした可能性津波の評価解析

大分・別府地方における地震活動が北東側に進展した場合を想定する。そこで、別府湾 沿岸部における最大クラスの地震として、慶長豊後型地震(活断層地震: M8.1)による津 波解析を行なう。また、地震活動が更に北東側に進展した場合を想定して、中央構造線断 層帯まで断層破壊が生じた場合(M8.7)や、慶長豊後型地震の内、豊予海峡の断層破壊が 生じなかった場合(M7.9)の可能性津波も併せて価した。



大分県の想定地震モデル(慶長豊後地震モデル:M8.1)



図9 想定地震の断層位置

6.2.1 計算条件

計算対象領域を図 10 に示す。ここで、ネスティング計算による空間解像度は 810-270-90 m の三段階としており、中央防災会議の公開データを利用した。また、別府湾沿岸部に おける平均的な朔望平均満潮位として、潮位を T.P. +1.9 m に設定した。そして、断層モ デルとして、表 2 に示す慶長豊後型地震(M8.1)や中央構造線断層帯地震の断層モデルを 組み合わせた地震を想定する <sup>5,6</sup>。すなわち、「①慶長豊後型地震: M8.1 (豊予海峡+別府 地溝南縁+別府湾断層帯)」、「②縮小版慶長豊後型地震: M7.9 (別府地溝南縁+別府湾断層 帯)」及び「③拡大版慶長豊後型地震: M8.3 (豊予海峡+別府地溝南縁+別府湾断層帯+中 央構造線断層帯)」による地殻変動を弾性体理論 <sup>3</sup> により算出し、可能性津波を評価する。 なお、計算対象時間は地震発生後 3 時間である。

ところで、図 11 に示す通り、①、②及び③による地殻変動の鉛直変位に殆ど差異はない。 これは、豊予海峡や中央構造線断層帯の断層運動が横ズレであるためである。



図 10 大分・別府地方を対象とした計算領域

表2 慶長豊後型地震(M8.1)や中央構造線断層帯地震の断層モデル(「①慶長豊後型地震: M8.1」、「②縮小版慶長豊後型地震:M7.9」及び「③拡大版慶長豊後型地震:M8.3」)

		緯度 N ( <sup>°</sup> )	経度 E (゜)	深さ d (km)	走向 θ(°)	<b>傾斜角</b> δ(゜)	すべり角 ぇ(゜)	断層長さ <i>L</i> (km)	断層幅 W(km)	すべり量 <i>U</i> (m)
1 1	豊予(ほうよ)海峡	33.253297	131.715983	0	62.7	90	150	26.2	15	5.0
	別府地溝南縁 1	33.253714	131.715948	0	251.4	75	-90	9.5	15.5	3.1
		33.226421	131.619195	0	290.0	75	-90	16.8		
800			131.449864	0	246.0	75		12.8		
	別府湾断層帯	33.360271	131.515867	0	103.5	75	-90	22.5	15.5	6.0
111		33.340350	131,640614		85.6					3.0
1	中央構造線断層帯	33.38333	131.95	0	70	90	20	130	<u>15</u>	3.0



図 11 地殻変動による海底及び地表面の鉛直変位の計算値(地殻変動の水平移動を考慮)

6.2.2 可能性津波の規模に関する計算結果(最大水位・最大流速の分布)

可能性津波の規模を調べる。図 12 に、最高水位分布を示す。3 ケース全ての傾向として、 別府湾内沿岸部における津波高は T.P. +4 m 以上であり、大きな津波が襲来することが想 定される。そして、別府湾内の活断層の短軸方向の沿岸部(別府湾内の北と南)において 大きな津波高が出現する。また、3 ケースの水位分布は図 6-2-3 の地殻変動の鉛直変位と同 様に類似しており、②の別府湾内の活断層地震の影響が支配的であると言える。

他方、3 ケースそれぞれの最高津波高は、大分市神埼で出現し、その値は、それぞれ、① T.P. +8.86m、② T.P. +8.27m 及び③T.P. +8.74 m であった。このように、地震規模が最も 大きい条件は③であるものの、地震規模としては中程度である①の場合に、最高水位を示 しており、必ずしも地震規模と津波規模とが一致するとは限らない。

図 13 には、本計算条件の最大流速分布を示している。別府湾内の汀線付近において概ね 同等の大きな津波高が想定されることに対して、流速分布の傾向は若干異なる。すなわち、 別府湾内の北と南側(活断層の短軸方向)の流速は水位と同様に顕著であるが、別府湾奥 における流速は比較的小さい。しかしながら、別府湾内における流速は概ね 1 m/s 以上で あるため、浸水せずとも海域における大きな水産被害が懸念される。なお、3 ケースにおけ る最大流速は、図中に示す杵築市において、 7.53 m/s である。

**6.2.3** 可能性津波の到達時間及び継続時間に関する計算結果(水位と流速の時系列)

可能性津波の到達時間及び継続時間に関する計算結果を報告する。図14に、各地点にお ける水位及び流速の時系列を示す。ここで、黒線が①の水位、灰線が②の水位、赤線が③ の水位である。また、橙線が①の流速の絶対値であり、値は図中の右側である。図より、 別府湾内では、地震発生後5分~10分程度で第一波ピークが到達する。また、殆どの地点 において第二波以降に最大波が出現している。対象水域が湾地形であることや、更には、 九州と四国とに挟まれた領域であることなど、複雑で閉鎖的な水域であるために津波が複 雑に反射・重合するためであろう。例えば、図14における別府湾の湾奥部では、周期が2 時間程度の長周期振動も確認されており、様々な振動モードを含んでいることがわかる。



図14 各地点における水位及び流速の時系列

6.3 まとめと提言

本章では、平成28年熊本地震の地震活動と過去の履歴に基づき、熊本(天草・八代地方) 及び大分・別府地方を対象とした可能性津波を評価した。得られた結果の中で、「活断層(横 ずれ)による津波の発生」及び「津波の規模と到達時間、継続時間」に着目すると、可能 性津波の傾向と今後の注意点(施設健全性・津波避難の留意点など)は以下の通り整理さ れる。

- ・横ズレによる活断層地震が生じる場合、地殻変動の水平移動が大きくなるため、水
  平移動による地底の鉛直変位を津波の発生において考慮する必要がある。
- ・熊本(天草・八代地方)の可能性津波による津波高の最高値は T.P. +2.92 m であり、 地震発生後 20 分程度で第一波ピークが陸域へ到達する。
- ・熊本(天草・八代地方)の可能性津波では、初期潮位が低い場合、最大流速は増加 する。従って、初期潮位が低い場合には、陸域の被害は小さくなる一方で、干潟の 生態系や養殖施設などの沿岸生態系の被害が増大することが懸念される。
- ・大分・別府地方の可能性津波(慶長豊後型地震津波)による津波高の最高値は T.P. +8.86 m であり、地震発生後5分~10分程度で第一波ピークが陸域へ到達する。
- ・大分・別府地方の可能性津波に対して、豊予海峡及び中央構造線断層帯の活断層地 震の影響は比較的小さく、別府湾内の活断層地震の影響が支配的である。
- ・熊本(天草・八代地方)の八代海や別府湾のように、閉鎖性水域において津波が生じる場合、津波は中々減衰せず、長時間にわたって振動することが想定される。更に、閉鎖性水域では副振動(共鳴)が励起され、津波の増大や第二波以降に最大波を伴う可能性を有するため、例え、第一波の津波高が小さくとも、継続的な注意が必要である。
- ・平成28年熊本地震のような直下型地震によって津波が生じる場合、海岸保全施設や 河川堤防などの防御施設規模が津波規模に対して十分であったとしても、直下型地 震ゆえの強いゆれのため、津波来襲前に海岸保全施設や河川堤防の機能低下が危惧 される。
- ・熊本(天草・八代地方)及び大分・別府地方の可能性津波は、沿岸部への津波到達 が早く津波避難が難しいため、地域防災計画など十分な津波対策が求められる。

<参考文献>

- 1) 熊本県地域防災計画,地震・津波被害想定調査検討,第2回地震・津波被害想定検討部 会資料【津波解析】,熊本県,2012.
- 2) 平成 25 年地震調查研究推進本部地震調查委員会, 2013.
- Okada, Y., Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol.75, No.4, pp.1135-1154, 1985.
- 4) Tanioka, Y. and Satake, K., Tsunami generation by horizontal displacement of ocean

bottom, Geophys. Res. Lett., 23, 861–864, 1996.

- 5) 大分県津波浸水予測調査結果(確定値)について,大分県,2013.
- 6) 中央構造線断層帯(金剛山地東縁-伊予灘)の長期評価(一部改訂)について, 地震調 査研究推進本部地震調査委員会, 2011.