

2016年熊本地震と関連する活動に関する総合調査

清水洋¹・松本聡¹・酒井慎一²・岡田知己³・渡辺俊樹⁴・飯尾能久⁵・
相澤広記¹・松島健¹・高橋浩晃⁵・中尾茂⁶・鈴木康弘⁴・後藤秀昭⁷・
大倉敬宏⁸・山本希³・中道治久⁵・山中浩明³・神野達夫⁹・三宅弘恵¹⁰・
瀧澤一起²・浅野公之⁵・松島信一⁵・福岡浩¹¹・若井明彦¹²・大井昌弘¹³・
田村圭子¹⁴・木村玲欧¹⁵・井ノ口宗成¹⁶・前原喜彦¹⁷・赤星朋比古¹⁷

1. 九州大学大学院理学研究院 地震火山観測研究センター

2. 東京大学地震研究所

3. 東北大学大学院 理学研究科

4. 名古屋大学大学院 環境学研究科

5. 京都大学防災研究所

6. 鹿児島大学大学院 理工学研究科

7. 広島大学大学院 文学研究科

8. 京都大学大学院 理学研究科

9. 九州大学大学院 人間環境学研究科

10. 東京大学大学院 情報学環

11. 新潟大学 災害復興科学研究所

12. 群馬大学大学院 理工学府

13. 防災科学技術研究所

14. 新潟大学 危機管理室

15. 兵庫県立大学 環境人間学部

16. 静岡大学 情報学部

17. 九州大学大学院 医学研究院

要 旨

2016年熊本地震に関して、地震・地殻変動観測や変動地形学的調査に加え、強震動、土砂災害、災害情報、災害過程、災害医療などの総合的調査を実施した。熊本地震は、布田川・日奈久断層帯の右横ずれ運動によって発生したが、走向・傾斜などの断層形状が異なる複数の断層面が活動したと考えられる。被害の大きさと余震の加速度振幅の空間分布には強い相関が認められた。地すべりについては、せん断時に発生する過剰間隙水圧が発生要因の一つであることを明らかにした。熊本地震災害は、都市型災害と中山間地域の災害が同時に発生した広域複合災害であることを示し、エコノミークラス症候群などの災害医療も含め、それらの教訓と対策を考察した。

キーワード：熊本地震，布田川断層帯，日奈久断層帯，活断層，強震動，地すべり，広域複合災害，エコノミークラス症候群

1. はじめに

2016年4月14日、熊本県熊本地方でマグニチュード6.5の地震が発生した。この地震により、熊本県益城町で最大震度7を観測し、大きな被害をもたらした。さらに、16日にはM7.3の地震が発生し、建物の倒壊、土砂災害により40人以上の生命が失われた。この2つの地震は、それぞれ南北方向、北西-南東方向に張力軸を持つ横ずれ断層型で、この地域を北東-南西方向に走る布田川断層帯と日奈久断層帯が活動したものと考えられる。今回の地震災害は、最初のM6.5の地震で傷んだ家屋が、それに続いて発生したM7.3の地震で倒壊した可能性も大きく、内陸地震の続発という現象は学術的に見て重要な現象であると同時に、今後発生する内陸地震による災害の軽減に、学術的に貢献できる重要な知見がもたらされると思われる。

本研究では、今後の活断層評価や防災対策に資することを目的として、陸上臨時地震観測等による余震活動・地殻構造調査、GNSS及び変動地形学的手法を用いた地殻変動調査、阿蘇山における地震・火山活動の変化と大きな地震の発生に伴う火山活動への影響調査、災害調査・強震観測による強震動発生特性調査、土砂災害及び地すべり発生機構調査、社会素因による被災救援、地域社会に係る影響調査、深部静脈血栓症（エコノミークラス症候群）の発生状況と医療活動の調査を実施した。これらの調査研究は2016年8月現在も継続中であるが、ここではこれまでに得られている研究成果を報告する。

2. 陸上臨時地震観測等による余震活動・地殻構造調査

(1) はじめに

2016年熊本地震は4月14日M6.5（最大震度7）からはじまり、最大地震4月16日のM7.3（最大震度7）、さらに多くの規模の大きな地震が発生した。この地域は、従来から微小地震活動が活発な地域であると同時に、活断層として布田川-日奈久断層帯が中央部に位置する地域である。この地域では一連の地震発生前に大学、防災科研、気象庁による定常的な地震観測網のほかに約40点の臨時観

測点が展開されていた。地震発生後、大学および産総研、防災科研などが協力し、熊本から大分にかけての広範囲に稠密臨時地震観測点を展開し、現在（2016年7月時点）も継続中である。この臨時地震観測ではオンライン観測点9点およびオフライン観測点59点が展開されている。さらに、日奈久断層帯の北部から日奈久断層帯・布田川断層帯の接合部を経て阿蘇山北側に至る約65kmの区間においては稠密地震観測を行った。また、地震活動と比抵抗構造との特徴を従来のデータをコンパイルすることによって把握する。

(2) 震源分布の特徴

臨時地震観測網による観測データから震源分布の特徴が得られた(九州大学・ほか, 2016)。収録されている地震波形から手動検測によって決定された震央分布を図1に示す。震源はSaiga et al. (2010)による3次元速度構造を用いて、Double Difference法によって決定された。図中の震央は地震前(1996年～)[期間1]、4月14日M6.5以降～4月16日M7.3前[期間2]、それ以降[期間3]に区分している。また、M5以上の震央は星印で示している。発震機構については初動極性によるものと、気象庁によるCMT解を示している。図中には活断層の地表トレースもプロットしている。

この地域の通常発生している地震活動は図1の分布から見て取れるように、断層およびその周辺の広範囲に分布している。このうち1999年から2000年においては日奈久断層沿いに最大マグニチュード5の地震が発生している。M6.5の地震はこの震源域よりやや西に位置し、発生後は日奈久断層のトレースよりやや西側で震央が分布していることがわかる(期間2の震央分布)。M7.3発生後は日奈久断層、布田川断層沿いだけではなく広範に活発な地震活動が起こっている。発震機構解を見ると、M6.5の初動解は東落ちの高角な横ずれ断層である。走向は日奈久断層のよりやや時計周りに回転している。一方、CMT解はほぼ日奈久断層走向と一致している。また、M7.3についてはその走向が初動解とCMT解でかなり異なることがわかる。このように、熊本地震は複雑な断層形状を持つ活動であることが明らかになった。布田川断層、日奈久断層にそれぞれ直交する断面における震源分

布を見ると，布田川断層近傍は多くのクラスターが見られ，明瞭な断層面が震源からは見られない。

一方，日奈久断層に対応する断面においては比較的明瞭な断層面と考えられる震源分布が見られる。特に，布田川断層との接合部付近は高角の断層面が複数確認できる。熊本地震の活動だけでなく，従来の活動においても異なった断層面を認識することができる。このように，日奈久断層周辺においては断層が複数存在する特徴が見られる。

(3) 熊本地震の発生場

この地域においては地震以前の発震機構解を用いて応力テンソルインバージョン解析がなされている。九州全体においては南北もしくは北北西-南南東の方向を向く主張力軸が大きな特徴として挙げられる。熊本地震の発震機構解もこの特徴を持っている。応力比の解析から，別府-島原地溝帯および震源域においては最大主圧縮応力と中間主応力が近い値を取ることが明らかになっている。これは，地震発生メカニズムとして横ずれ断層，正断層のどちらでも起こりうる応力場であることを示している。この応力場の状態が横ずれ断層や正断層成分を持つ地震が混在し，複雑な活動様式を示す 2016 年熊本地震に影響していると考えられる。

(4) 稠密地震観測

稠密地震観測測線は，日奈久断層帯の北部から日奈久断層帯・布田川断層帯の接合部を経て阿蘇山北側に至る約 65km の区間に設定し，観測点を 250m-500m 間隔で 225 箇所を設置した。また，測線周辺の 25 箇所にも面的に配置した。観測は，2016 年 4 月 30 日～5 月 29 日まで実施し，各観測点では，固有周波数 4.5 Hz の地震計によって上下動及び水平動の 3 成分観測を行った。収録は，Geospace 社製の独立型レコーダである GSX-3 を使い，サンプリング周波数は，測線上の 225 観測点では 500Hz，測線周辺の 25 観測点では 250Hz に設定して連続収録を行なった。

気象庁一元化震源リストによると，観測期間中に余震域を含む研究対象地域（緯度 32.6°-33.2°N；経度 130.5°-131.3°E）では Mj1.0 以上の地震の震源が 920 個決定されている。

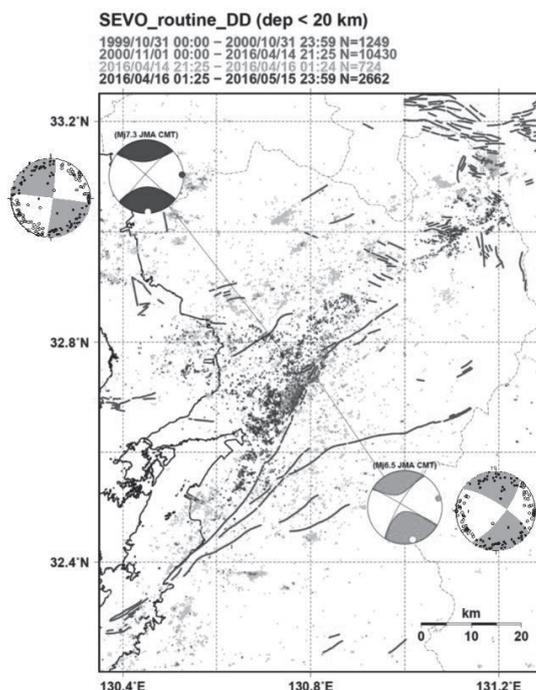


図 1 再決定された震源分布

稠密余震観測で得た連続記録から，これら地震の震源時刻に従って，イベント毎へのデータ編集を実施した。観測波形の一例を図 2 に示す。得られた記録は良好で，初動が明瞭に観測されている。

(5) 比抵抗構造

従来までに別府-熊本にかけて行われている，比抵抗構造調査のデータを総合的に解析し，比抵抗構造を得た (Aizawa et al., 2016)。247 点での広帯域 MT 観測 (0.005-3000 秒) のデータを解析からの結果を図 3 に示す。これによると，2016 年熊本地震は低比抵抗と高比抵抗の境界部分に発生する結果が得られた。これに対して，低比抵抗の領域においては地震活動が極めて低いことが明らかになった。これらのことから，今回の地震は局所的な応力蓄積と低比抵抗領域からの流体供給によって発生したと考えられる。これらは，他の内陸地震発生域で得られてきた知見と整合的である。

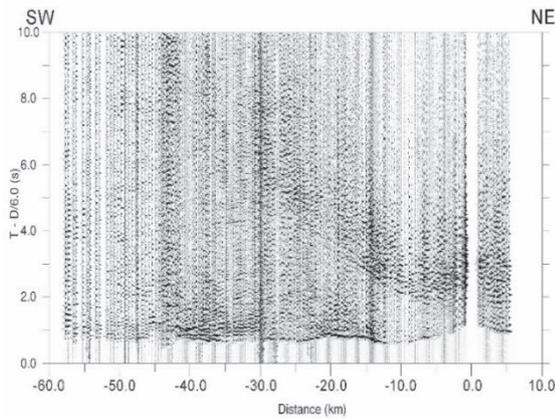


図2 観測波形例（上下動成分）（震源時：2016/5/5 3:17:10.23, Latitude: 33.0335 °N Longitude: 131.1548 °E 8.8 km deep, $M_{JMA}=3.4$ ）。横軸は震央距離，縦軸の時間は原点が震源時に対応する。振幅はトレースごとに最大振幅値で規格化して示してある。波形記録にはフィルター処理を施していない。

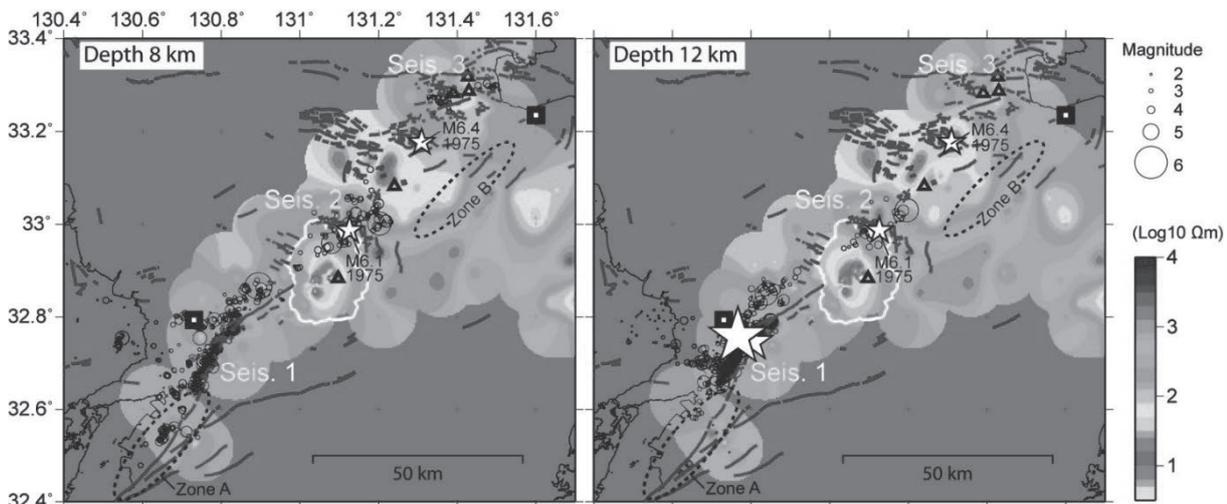


図3 広帯域MT観測データから得られた比抵抗構造分布

3. GNSSおよび変動地形学的手法を用いた地殻変動調査

3.1 GNSSによる地殻変動観測

2016年4月14日にM6.5の地震が熊本地方に発生し、震度7を記録した。翌4月15日午後に余効変動を観測する目的でGNSS連観測点を1点設置した。4月16日未明にM7.3の熊本地震が発生し、それとともに大分地方でも地震活動が活発化した。そのため、8大学が共同し、余効変動と大分地方での地震活動と地殻変動の観測を目的としてGNSS連続観測点をさらに20点設置し、観測を継続している。本震発生後4月17日から設置を開始し、4月28日に21点目の設置を終え、観測を開始した。GNSSのデータは数ヶ月に一度現地に行き、回収し、

鹿児島大学に送られている。鹿児島大学では、国土地理院からGEONETのデータを、気象庁から常時観測されている火山に設置されたGNSSデータの提供を受け、さらに、地震発生前より九州大学、京都大学、鹿児島大学で行っていたGNSS共同観測のデータとあわせて、解析を行っている。図4に解析を行っている観測点を本研究で設置した21観測点とともに示す。

解析はBernese GNSS Software V5.2を使用し、CODE精密暦、CODE地球回転パラメータを用い、各観測点の座標値を1日ごとに推定している。大気伝播遅延量はVMF1マッピング関数を用いて2時間ごとに、その勾配は1日ごとに推定している。解析された観測点の時系列を図5に示す。余効変動が観測されていることがわかる。しかし、その変動には観測点により違いが

見られ、地震断層北西の観測点では、大きな余効変動は地震後半月ほど継続し、その間最大で約1cmの変動量であったのに対し、南東側の観測点は、1月半後もまだ余効変動は継続しており、その量は最大で約6cmである。つまり、断層をはさんで余効変動の変位が対象になっていないことを意味し、横ずれ断層のアフタースリップのみで説明するのは難しいと考えられる。

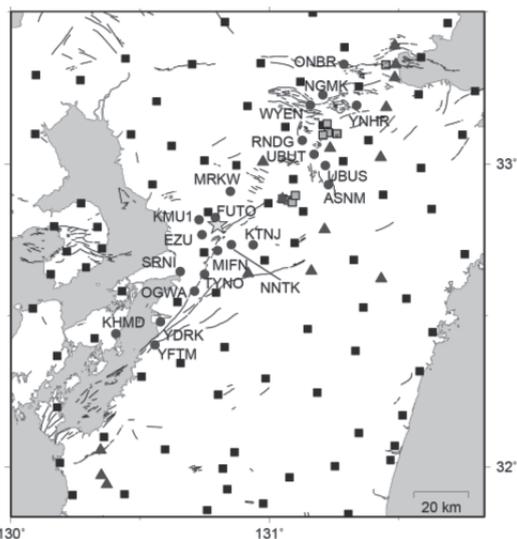


図4 本研究で設置したGNSS連続観測点(丸)、九大・京大・鹿大(三角)、GEONET(黒四角)と気象庁(灰色四角)のGNSS連続観測点の配置を示す。星印は本震の震央位置を示す。

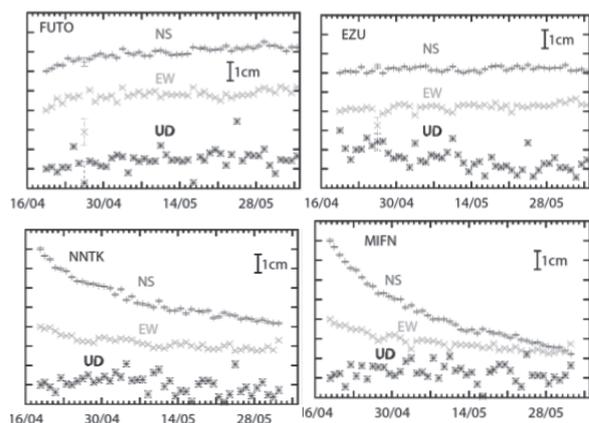


図5 本震後の観測点位置の変化。上段(FUTO, EZU)は地震断層北西側に設置された観測点であり、下段(NNTK, MIFN)は南東側に設置された観測点である。

本調査研究は、以下のメンバーによって実施された：中尾茂¹、松島健²、田部井隆雄³、大久保慎人³、山品匡史³、大倉敬宏⁴、西村卓也⁵、澁谷拓郎⁵、寺石真弘⁵、伊藤武男⁶、鷺谷威⁷、松廣健二郎⁶、加藤照之⁸、福田淳一⁸、渡邊篤志⁸、三浦哲⁹、太田雄策⁹、出町知嗣⁹、高橋浩晃¹⁰、大園真子¹⁰、山口照寛¹⁰、岡田和見¹⁰(1. 鹿児島大学、2. 九州大学、3. 高知大学、4. 京都大学、5. 京都大学防災研究所、6. 名古屋大学、7. 名古屋大学減災連携研究センター、8. 東京大学地震研究所、9. 東北大学、10. 北海道大学)

3.2 熊本地震に伴う地表地震断層のトレースと変位量分布

大学合同地震断層調査グループは、2016年4月14日Mj=6.5の地震発生の翌日15日から調査を開始し、14の大学・機関、23名の合同により、一連の熊本地震の地表地震断層全体の分布、変位量を明らかにした。その結果の概要は以下の通りである。

- (1) 地表地震断層の長さは少なくとも31kmであり、阿蘇カルデラ北部の異常変形までを含めると、長さ40kmに達する。
- (2) 今回の活動は、これまで知られていた布田川一日奈久断層帯北東部と出ノ口(いでのくち)断層に概ね沿って生じており、これらの断層の再活動であると思なせる。いくつかの地域では、従来知られていない範囲にトレースが延びる。また、いくつかの地点では、一般走向に対して共役なN60°-70°Wの走向のトレースも認められる(図6)。
- (3) 布田川断層沿いの地表地震断層の変位は、全体として右横ずれ変位が卓越する(図7)。本震の震央から約8km北東に離れた付近から大きくなる。並走する断層の変位量を累積した変位量の合計は概ね100cm以上となり、最大変位量は250cmに達する。上下変位は、西原村より南部では南西側上がり、西原村より北部では北東側上がりとなる。上下変位は概ね100cm以下である。
- (4) 出ノ口断層は、南西側上りの上下変位が卓越し、一部で左横ずれ変位が認められる。上下変位は平均100cm程度で最大

200cm に達する。

(5) 14日の地震では日奈久-布田川断層帯の一部で地表地震断層が生じ、16日の地震に伴い、同じ線上で14日の地震後の変位より大きい変位が生じた。

大学合同地震断層調査グループ: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, 津村駿斗

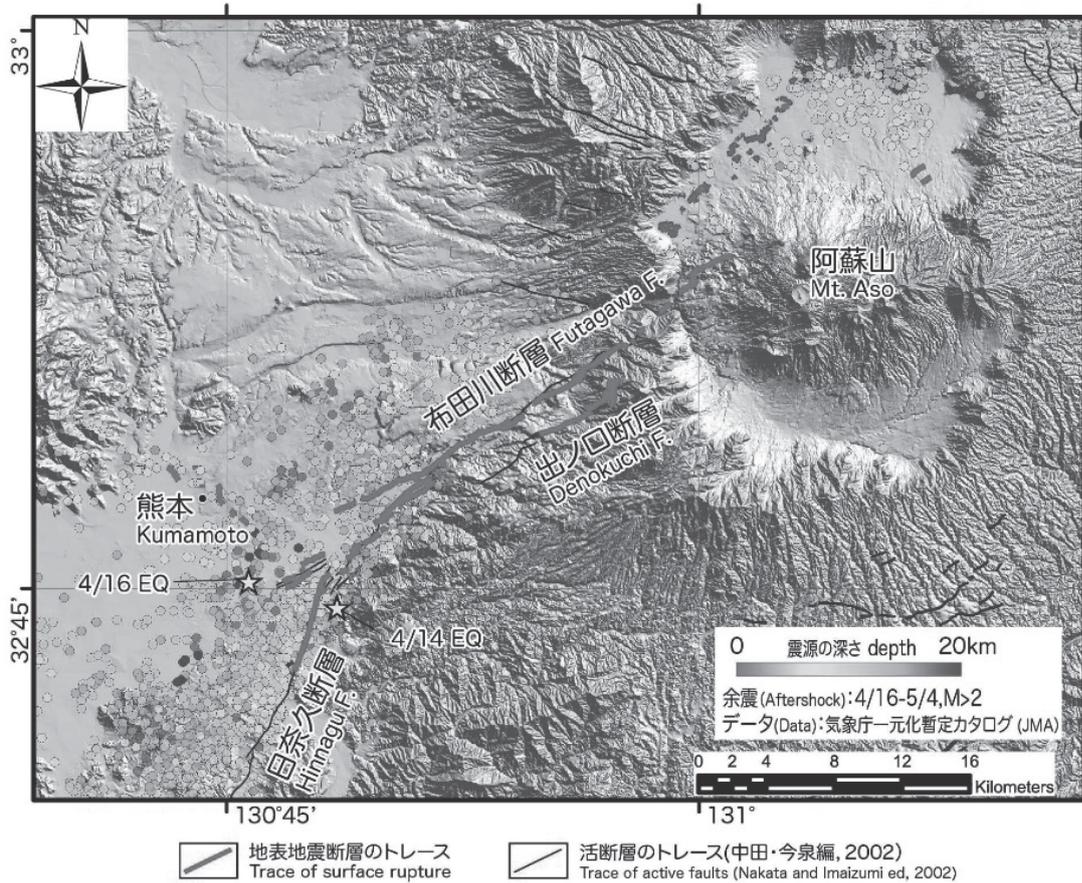


図6 熊本地震に伴う地表地震断層のトレース

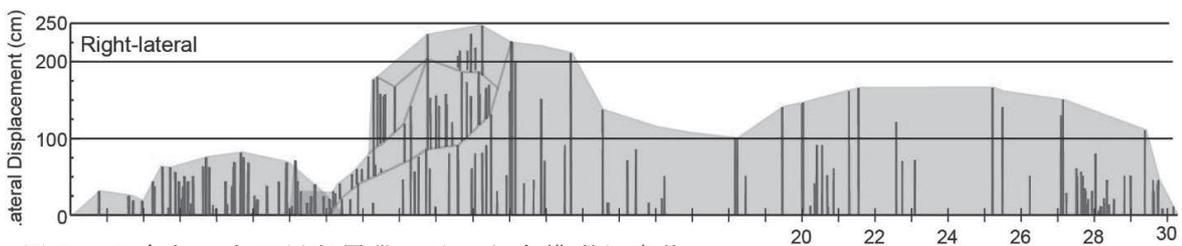


図7 日奈久-布田川断層帯に沿った右横ずれ変位

4. 災害調査・強震動観測による強震動発生特性調査

4.1 強震動から推定した震源破壊過程

東京大学地震研究所のグループは、震源モデルの推定と特定の地域に集中した強震動分布の成因を推定した。2016年4月14日から16日にかけて発生した M_{JMA} 6.5, 6.4 および 7.3 の地震を中心とする熊本地震では、熊本県益城町や熊本県西原村で震度7が複数回観測され、大きな被害をもたらした。こうした震源近傍の強地震動や、それに伴う被害の解釈には震源過程解析を行うことが不可欠であるので、強震、遠地、測地データを用いたジョイントインバージョンを行った。断層モデルの構築にあたっては、地表地震断層位置、余震分布、SAR 解析結果などを考慮に入れると、4月15日の地震を除いて単純な1枚の平面で表現することが難しいため、日奈久・布田川断層帯の接合部および阿蘇カルデラ内で分割して複数のセグメントで表現した。インバージョンの結果によれば、3地震の同じ断層面上のすべり分布はほぼ相補的であった。また、震度7の強震動を起こした4月14日と16日の地震では、どちらも主な断層破壊がやや深い破壊開始点から震度7の地点に向かって、北東方向上向きに伝播していたことがわかった。

また、集中した強震動分布の成因については、以下が考えられる。たとえば4月16日の地震は実質的な断層長さが40~50 kmあり、破壊開始点は南西端に近い地点にあるので、横ずれ断層地震のディレクティブティ効果によって兵庫県南部地震並みの長い強震動分布が、断層破壊の進展した北東方向に現れるはずだが、実際の強震動分布は益城町と西原村の周辺に集中したものであった。また、ディレクティブティ効果による速度パルスもこの集中した強震動分布の中にしか現れなかった。この矛盾の原因を上記のインバージョン結果から推定すると、今回の地震の断層破壊では北東方向の横向き伝播だけではなく、やや深い破壊開始点から上向きに伝播する成分が大きいことが影響したと考えられる。その結果、強震動分布は地表面で打ち切れ、破壊開始点からこの打ち切り点までが強震動域となった。4月14日の地震も規模は小さいが同様の現象が起きたと見られる。

一方、京都大学防災研究所のグループは、強震波形記録を用いて4月14日21時26分の地震と4月16日1時25分の地震の震源破壊過程を推定した (Asano and Iwata, 2016)。解析方法はマルチタイムウィンドウ線形波形インバージョン法 (Hartzell and Heaton, 1983) を用い、強震波形記録 (K-NET, KiK-net, F-net, 気象庁) に適用した。時空間の平滑化は Sekiguchi *et al.* (2000) に従い、平滑化の強さと第1タイムウィンドウフロントの伝播速度は ABIC 最小規準によって決定した。4月14日21時26分の地震は、地震直後の余震分布及び防災科学技術研究所 F-net のモーメントテンソル解の情報から、日奈久断層帯北端部付近でのほぼ鉛直の断層面 (走向 212 度、傾斜 89 度、長さ 14 km、幅 13 km) を仮定し、13 地点の強震記録から得られた速度波形3成分 (0.05-1 Hz) を解析した。深さ 11.4 km の破壊開始点付近にすべりの大きな領域が見られたほか、北東側のやや浅い部分 (深さ 5 km 程度) にもすべりの大きな領域がみられた (図8)。

2016/4/16 01:25 Mw7.0

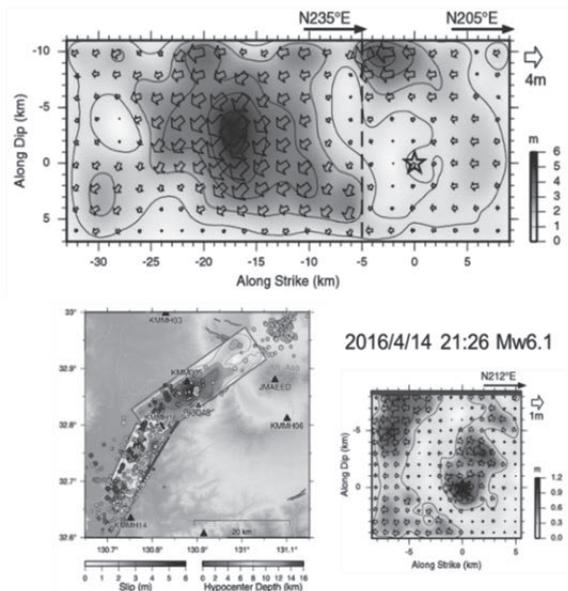


図8 (上)4月16日1時25分の地震(Mw7.0)の最終すべり分布。

(左下)4月14日21時26分の地震(青)と4月16日1時25分の地震(赤)の断層面の位置及び24時間以内の余震の震央。

(右下)4月14日21時26分の地震(Mw6.1)の最終すべり分布。

地震モーメントは 2.04×10^{18} Nm (Mw6.1) , 平均すべり量 0.36 m, 最大すべり量 1.2 m であり、右横ずれのすべりが主であった。最適な第

1 タイムウィンドウフロントの伝播速度は 2.2 km/s と推定された。なお、すべり分布と直後の余震分布の関係は相補的であるとともに、1999 年から 2000 年のまとまった地震活動もすべりの大きな領域の外側に震源が集中している。

4 月 16 日 1 時 25 分の地震については、余震の空間分布や現地調査チームにより報告されている布田川断層帯から日奈久断層帯北部にかけての地表地震断層の情報を考慮し、日奈久断層帯北部（走向 205 度、傾斜 72 度、長さ 14 km、幅 18 km）と布田川断層帯（走向 235 度、傾斜 65 度、長さ 28 km、幅 18 km）に沿った 2 枚の断層面からなるモデルを設定し、15 地点の強震記録から得られた速度波形 3 成分（0.05-0.5 Hz）を解析した。破壊は日奈久断層帯北部の深部から開始し、布田川断層帯に移った破壊は断層深部から北東にユニラテラルに伝播しつつ、浅い方向へ広がっていった。布田川断層帯の延長にある阿蘇カルデラ西部で破壊は停止した。最大すべりを伴うサブ断層の深さは約 8~10 km であり、モーメントテンソル解のセントロイドが深めに決まっていることとも調和的である。地表に最も近いサブ断層のすべり量は 1~3 m 程度である。地震モーメントは 4.50×10^{19} Nm (Mw7.0)、平均すべり量 1.9 m、最大すべり量 5.1 m であった。最適な第 1 タイムウィンドウフロントの伝播速度は 2.4 km/s である。以上のことから、日奈久断層帯北部での前震活動を伴い、Mw7.0 の地震時には日奈久断層帯北部から布田川断層帯にかけて、連続的に破壊が伝播した。断層面の傾斜が異なることから明らかなように、4 月 14 日と 16 日の地震は近接した異なる断層面を破壊したものと考えられる。

4.2 余震の強震動観測と微動観測

東京工業大学や東京大学地震研究所などのグループは、2016 年熊本地震の余震による強震動を観測することを目的として、2016 年 4 月 15 日から順次、臨時強震観測点の設置を開始し、図 9 の各点でおよそ 2 週間から 1 か月の余震観測を実施した（一部では観測を継続）。おもに被害が甚大であった地域を中心に観測を行い、益城町には 13 点（図 9 の上図）、西原村では 5 点、阿蘇市と南阿蘇村には 4 点、熊本市から宇土市にかけて 21 点設置した。得

られた強震観測記録には、 M_J が 5 以上の余震、計測震度 4 程度の記録が含まれている。益城町では、図 10 に示すように地震動の空間的な変動が著しく、被害の大きい地点で加速度振幅も大きい。

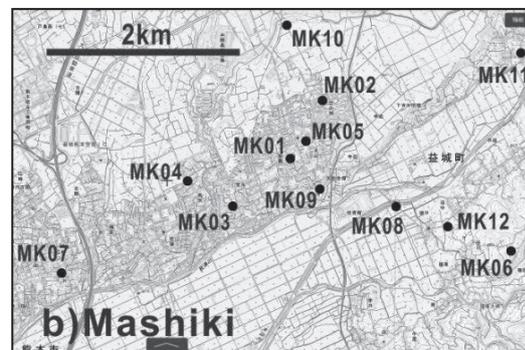
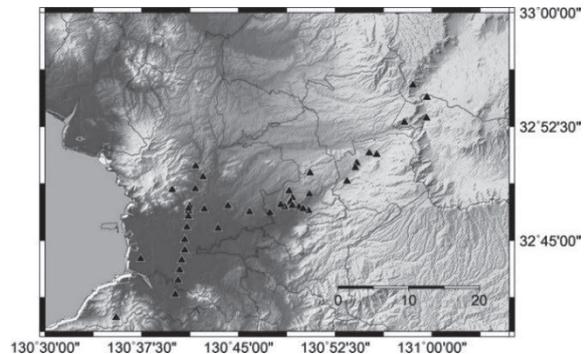


図 9 臨時強震観測点の位置（上の▲、下の●）

図 10 には、MK06（基準点とした）と各点で観測記録から計算された計測震度の差も示されている。被害が大きい地域では、震度差が 0.4~0.8 と大きくなっている。

西原村では、本震を記録した西原村役場、布田地区、大切畑地区や断層の南側にも設置した。それらの記録の変化は大きく、西原村役場では周期 0.5 秒程度で卓越した地震動を観測し、被害が甚大であった大切畑では非常に大きな短周期の地震動が観測された。南阿蘇村では被害が甚大であった河陽地区や立野地区に設置し、河陽地区における余震による地震動が、周辺に比べても大きいことがわかった。

熊本市では、南北と東西方向に観測線を設置した。熊本市の中心部の余震記録は、継続時間が長く長周期地震動が卓越している。臨時強震観測点のほぼすべての地点で微動アレイ探査を実施しており、地盤モデルを推定し

た後に、地盤震動特性について検討する予定である。

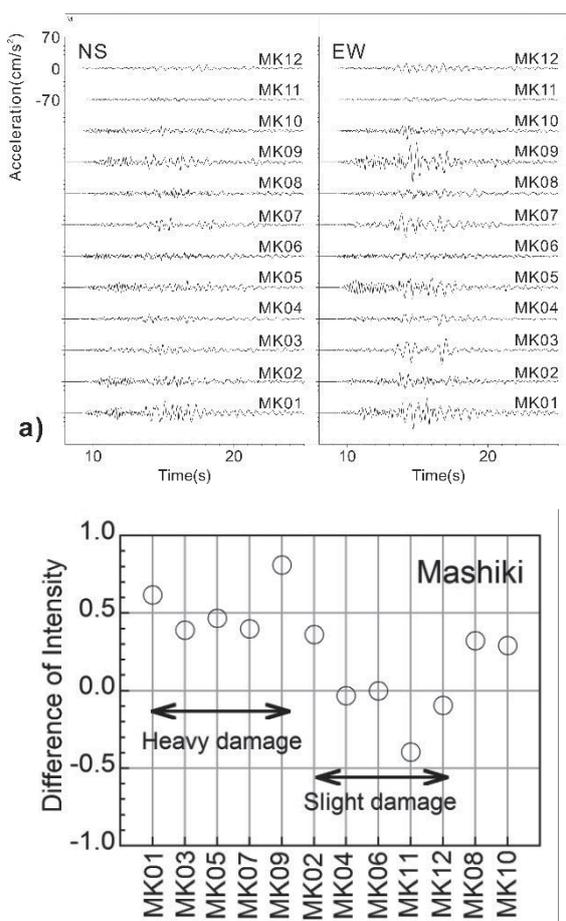


図 10 益城町で観測された地震動記録の例（上：19/APR/2016, M5.0, H11km の地震）と MK06 との計測震度の差（下）

一方、九州大学などのグループは、熊本県上益城郡益城町下陳地区を対象に、2016 年熊本地震により生じた地表地震断層近傍における建物の被害状況を調査するとともに、地表地震断層をまたぐ約 3 km の南北方向の直線上に 5 点の余震観測点を 0.5~1.1 km の間隔で設置し（図 11）、余震記録を用いて被害との関係について考察した。

余震観測は、過減衰型加速計（株）ミットヨ製, JEP-6A3, 観測点 3 のみ 5V/G, 他は 2V/G) とデータロガー（白山工業（株）製, LS-8800, 分解能 24 bit A/D) を用いて実施した。サンプリング周波数は 100 Hz とし、0.1~40 Hz が平坦となるような総合特性を有する。すべての地点において建物のコンクリート基礎に、磁北を基準として機器を接着剤で固定した。また、GPS の刻時信号を 6 時間毎に受信するこ

とで記録の同期を確保している。電源には小型のバッテリーを使用し、観測期間は 2016 年 4 月 23 日もしくは 24 日からの約 2 週間であり、その間連続観測を行った。観測点周辺の被害状況は以下の通りである。

- ・ 観測点 1 は畑が広がる平坦な地域にあり、標高は観測点 2~4 と比較して高い。周辺には地震計を設置した JA 上益城以外の建物はほとんどないが、その建物に被害はない。
- ・ 観測点 2 はグラウンドの倉庫の脇であり、近傍に住宅はなく、倉庫やトイレなどの建物に被害はない。ただし、観測点 3 との間で、住宅の屋根瓦の落下や外壁の損傷などの被害が見られた。
- ・ 観測点 3 は上陳地区の小学校の体育館の脇であり、地震計を設置した体育館の外壁の一部には損傷が見られ、校内にある石像の損傷、転倒も見られた。また、近傍に全壊した木造住宅も見られ、今回設置した観測点の中では最も被害が大きい。
- ・ 観測点 4 は下陳地区の中心に位置する。観測点近傍の地表断層直上の住宅で、梁の破断や建物の傾斜は見られるが、倒壊に至った住宅はない。
- ・ 観測点 5 の標高は最も高く、周辺に建物は少ない。観測点を設置した非常に古い木造住宅には被害は見られない。

余震観測の結果、観測期間内に発生し、いずれかの余震観測点で地震動が記録された地震の内、KiK-net 益城でも観測された Mj3.5 以上の地震は 26 地震であった（図 12）。観測された記録を用いて KiK-net 益城観測点に対するフーリエスペクトル比、および計測震度差を算定した結果（図 13）、観測点 1 と観測点 3 は KiK-net 益城観測点と同程度で、観測点 2、観測点 4 および観測点 5 は KiK-net 益城よりも小さく、被害の関係と定性的に対応することを確認した。

本震の震源断層面が北に傾斜していることを踏まえると、観測点 3 の方が観測点 4 や観測点 5 よりも震源断層面に近い可能性が考えられる。また、本震時には地盤の非線形化の影響も考えられることから、本震時の揺れの違いの定量的な評価のために、震源の影響の精査ならびに微動アレイ探査や単点微動観測等による地盤震動特性評価を実施する予定である。

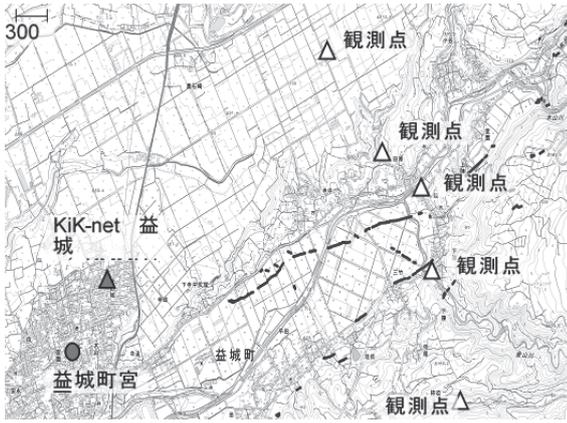


図 11 余震観測点の分布（地理院地図¹⁾に加筆）

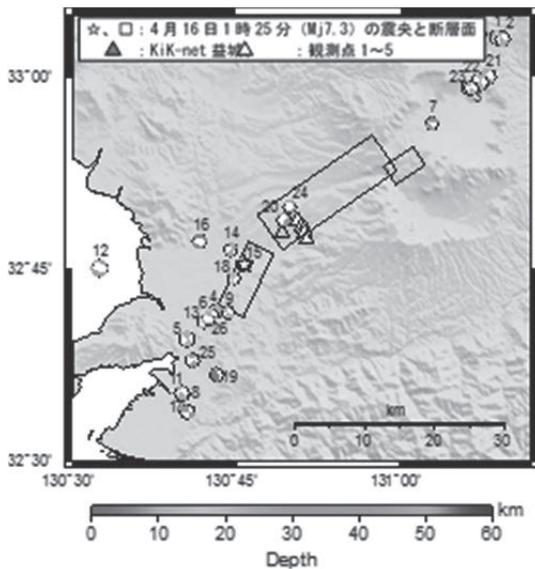


図 12 観測された余震の震央（震源位置は Hi-net²⁾，断層面は国土地理院³⁾による

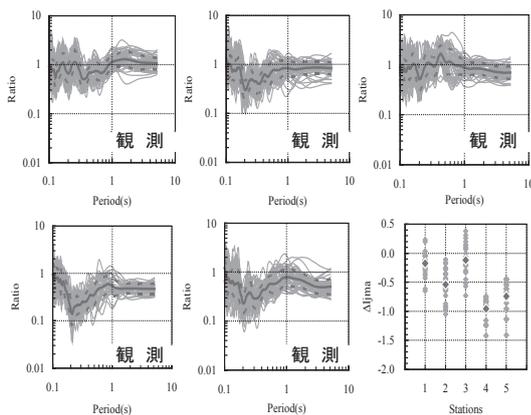


図 13 Kik-net 益城に対するフーリエスペクトル比と計測震度差

5. 土砂災害及び地すべり発生機構調査

5.1 平成 28 年熊本地震による地すべり災害：初動調査と発生機構

(1)はじめに

平成 28 年 4 月 14 日 21:26 に $M_{JMA}=6.5$, 深さ 11 km, 28 時間後の 4 月 16 日早朝 1:25 に $M_{JMA}=7.3$, 深さ 12 km の直下型地震が熊本県益城町付近で発生した。いずれも最大震度 7 を記録し, 最大地表加速度 (PGA) はそれぞれ 1,580 gal, 1,362 gal を記録した。これら前震, 本震の直接被害による死者は 49 名, うち 9 名が地すべりによるものである。(公社) 日本地すべり学会では, この地震による斜面災害の発生状況と被害実態を把握するため, 初動調査を平成 28 年 4 月 17 日から 19 日にかけて実施した。なお, この調査は新潟大学, 防災科学技術研究所および国際斜面災害研究機構の初動調査の一部としても実施した。

(2)地すべり分布図とタイプ

前震直後にアジア航測(株)等が市内及び斜面の写真撮影を行ったが, 地すべりは極めて限定的であった。しかし 4 月 16 日の本震により, 多数の地すべりが群発した。4 月 18 日に朝日新聞社および読売新聞社のヘリにより上空から地すべりの発生状況について観察した。地すべりは 3 種に分類される。(ア) 急崖の尾根付近で多発した地すべり (表層ないし少し深い斜面崩壊): 強震動が地形効果でさらに増幅されたために発生した崩壊が特にカルデラの縁で多数見られる (図 1)。(イ) 緩傾斜斜面で流動性の高い地すべり: 高野台の斜面で複数発生した地すべりが典型で, 10 度未満の緩傾斜で発生し, 長距離流動した (図 2)。(ウ) 崩壊誘起土石流: 地震中も先行降雨も無かったが烏帽子岳西側斜面では崩壊が多発し土石流が多発し大半は斜面上で止まったが, 山王谷川下流では流路を溢れた (図 3)。なお, 益城町の南方に広がる山地, および平成 24 年 (2012 年) 7 月豪雨により流動性崩壊が群発した阿蘇カルデラの北西の縁では今回の地震により誘発された地すべりは見られなかった。

(3) メカニズム

阿蘇大橋地すべりの末端付近の土砂および、高野台地区の流動性地すべりの土砂を採取した。どちらも褐色の火山起源の土砂が卓越している。X線回折(XRD)ではハロイサイトが卓越しているが、高野台試料にはカオリナイト類も含まれていた。また強熱減量解析によると腐植土起源と考えられる有機物をそれぞれ19%、14%含んでいることもわかった。現場一面せん断試験機を用いて12kPa、25kPaの低応力下で飽和定体積一面せん断試験を実施したところ、両試料ともにnegative dilatancyを示し、最小で11度の低い見かけの摩擦角を示した。これは非排水条件下で過剰間隙水圧が発生しうること示す。試験後の含水比はそれぞれ1.4、1.0と異常に大きく乾燥密度も低い。高野台のクロボク試料も含水比は1を超え定体積一面せん断試験では同様の低い見かけの摩擦角を示した。低い密度、高い含水比と保水能力、その結果としてせん断時に発生する過剰間隙水圧が地震時に地すべりを発生させる要因のひとつとなったと考えられる。



写真1 阿蘇大橋の地すべり (朝日新聞社機より福岡が撮影)



写真2 高野台地区の流動性の高い地すべり (読売新聞社機より福岡が撮影)



写真3 烏帽子岳西側溪流の土石流 (読売新聞社機より福岡が撮影)

5.2 FEM 解析に基づく斜面変動の発生要因の分析

地形・地質条件を考慮した有限要素法による地震応答解析(若井, 2008)を行い、斜面変動の発生要因の分析を試みる。解析対象としたのは、阿蘇大橋周辺の外輪山を含む2~3km四方の領域である。同地域は阿蘇山に由来する火山灰ならびに火山岩類等が堆積した地域であり、これらの材料パラメータの決定にあたっては、既往の類似した地質を対象とした解析事例(北村, 2014)などを参考にした。図14は解析対象とした領域の3次元有限要素モデル(20節点アイソパラメトリック要素, 減退積分)、図15は入力地震動波形(水平2成分のみ)である。地震波形は、防災科学技術研究所の強震観測網kik-netの益城観測所で観測された基盤波形データを使用させていただいた。解析において、土および岩の材料構成則には、せん断強度と動的変形特性を考慮しうるUWモデル(Wakai, 2004)を採用した。簡単化のため、有限要素モデルにおける地下構造は、深部から表層に向かって徐々に風化が進行して剛性ならびに強度が小さくなるような4層構造からなる地層モデルを仮定した。

地震応答解析の結果の一例として、地震後の地表面の残留変位量(ただし3成分の絶対値ノルム)の分布を図16に示す。同図には、実際に斜面崩壊が発生した箇所も灰色で描いてある。最も大きな崩壊箇所が阿蘇大橋の直上の大規模崩壊である。解析結果において地表面の残留変位が大きな箇所は、地震動による繰返し载荷が斜面内の塑性化をより進行させた部位であると考えられ、斜面内の土のせ

ん断破壊の程度と密接な関わりがあると考えられる。こうした予測される残留変位の大きな箇所と実際に崩壊が発生した斜面の源頭部との相関性の有無について今後検討を進める必要がある。

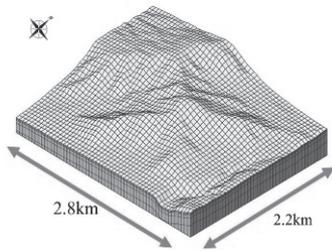


図 14 有限要素メッシュ

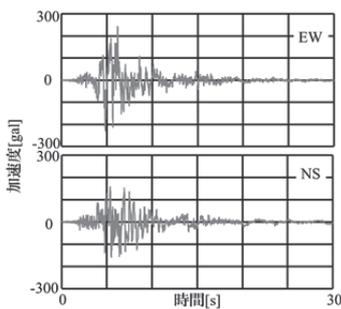


図 15 入力地震動波形

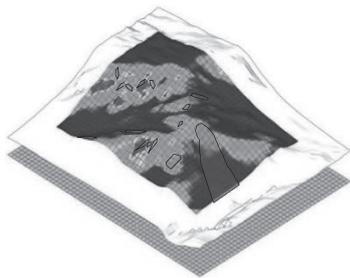


図 16 解析結果（地震後の残留変位）

6. 社会素因による被災救援, 地域社会に係る影響調査

6.1 平成28年熊本地震における特定メッシュの建物悉皆調査

強震計ネットワークを活用したリアルタイム被害推定の効果の実証的検討を行うため、益城町では、熊本地震で計測震度記録が得られている益城町役場周辺2メッシュ（1メッシュは、約250m四方）および辻の城公園周辺1メッシュの計3メッシュを対象とし、当該メッシュに含まれる全建物について被害状況（全壊、半壊、一部損壊、無被害）の調査を行った（図17）。

熊本市内では、リアルタイム地震被害推定システムによる全壊棟数が多く出ている地域を対象に、熊本市内の3地区についてそれぞれ4メッシュの計12メッシュのうち、被害があった建物のみ調査を行った。いずれの調査も、外観目視法によるものである。

今回の調査では、岡田・高井¹⁾²⁾の破壊パターンに基づき、建物被害を評価した。D0からD6までの7段階評価で、D4以上が自治体罹災証明の全壊に相当する。以下に、今回の調査で得られた結果をまとめる。

- ・益城町役場周辺では、新耐震基準（1981年以降の建築）の建物でも、全壊（D4,D5）が出ている。建物構造別では、全壊（D4,D5）の多くは、木造建物である。一方、辻の城公園周辺では、それほど大きな被害は見られなかった。
- ・リアルタイム地震被害推定システムは、益城町においては被害分布をある程度正しく推定できているが、熊本市内を含めた全体では全壊棟数を過大評価している。

本調査研究は、以下のメンバーにより実施された：佐伯琢磨*・中村洋光*・高橋郁夫*・内山庄一郎*・内藤昌平*・はお憲生*・大井昌弘*（* 国立研究開発法人 防災科学技術研究所）

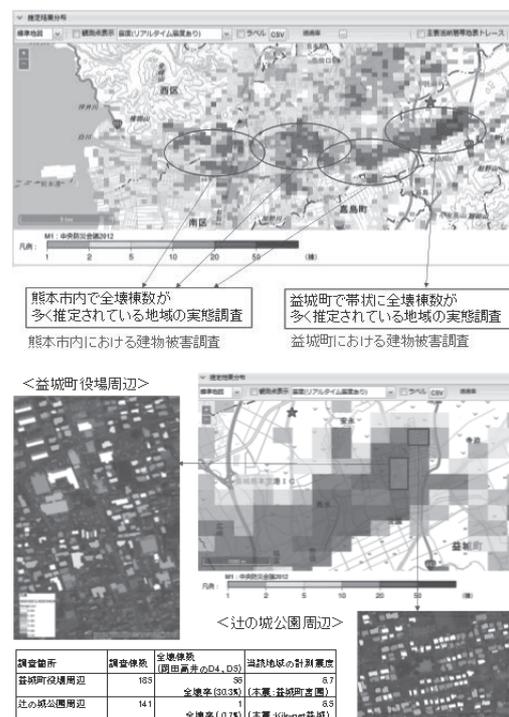


図 17 リアルタイム地震被害推定システムによる本震の全壊棟数推定結果（上）および今回の調査概要（下）

超（5月13日10,477人）が避難生活を送った。避難所避難のみならず。車中泊や軒先避難のような多様な避難形態が見られ、地域特性と余震の多さと大きさが影響を与えていると考えられる。2か月後には6千人（6月13日6,431人）、3か月後には5千人弱（7月13日4,870人）と余震が収まるにつれ、避難者も減少した。しかし、ほぼ4か月たった8月11日現在でも1,803人が避難所で避難生活をおくっている（図19）。なお、本分析における避難者にかかるデータのうち、4月25日から5月14日までは朝夕2回にわたって避難者数が報告されていたことから、図2の作成にあたっては、それぞれの平均値を当該日の避難者数として位置づけている。

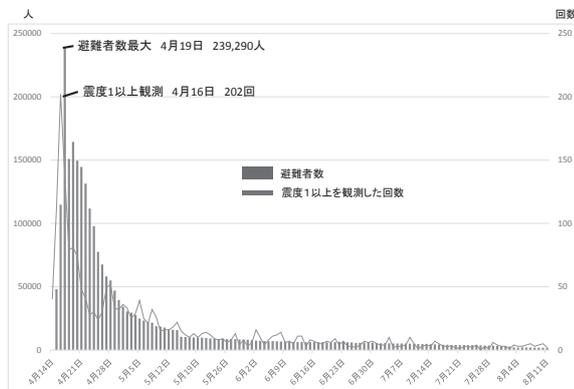


図19 熊本県避難者数の推移と余震発生回数
(熊本県, 2016) (気象庁, 2016)

(4) 避難所における被災者の実態

現在も避難所で生活を続ける被災者の実態解明のためのデータ整理ならびに分析を実施した。最も被害の密度が濃く、町全体が被災をした益城町における最大の避難所である「益城町総合体育館」を事例として実施した。なお、本データの整理ならびに分析は、益城町避難所PT（プロジェクトチーム）、福岡県応援職員、生活再建支援連携体が共働で実施したものである。

第5クール（7月1日～7月16日）の食事券配布状況（7月3日現在）から、避難者782名（未整理2人）うち、益城町民である避難者は、752人（337世帯）、それ以外の避難者28人であった。60歳代が全体の23.4%、70歳代が14.2%で、60歳以上で全体の38.4%を占める（図20）。

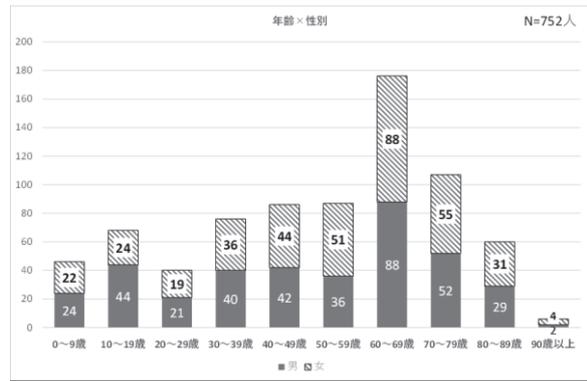


図20. 避難者における年齢分布

避難者における住家の被害割合を見ると、全壊・大規模半壊世帯が60.2%、半壊が10.1%、一部損壊が12.8%、り災証明書未受取りが16.9%であった。全体の6割を全壊・大規模半壊世帯が占めており、居宅の被災程度が重篤な被災者の避難所滞在率が多いことがわかった。一方、一部損壊であっても未だに避難を続けている世帯があり、その理由を知ることが併せて必要であることがわかった。また、そもそもり災証明書を受け取っておらず、居宅の被災程度が確定できていない人が16%超もいることが明らかとなった（図21）。被災者の生活再建の歩を進めるためにも、早い段階での居宅の被災程度の確認ならびにり災証明書発行が必要であることが明らかとなった。

避難している337世帯において、「生活再建支援金」の申込みは、全壊・大規模半壊世帯87.2%が基礎支援金に対し「申込み済み」であり、第一次的な支援が進んでいることがわかった。一方、加算支援金（今後の再建方針決定済み）申し込みは1.0%に留まっており、生活再建目途が立っていない避難者がほとんどであることがわかった（図22）。

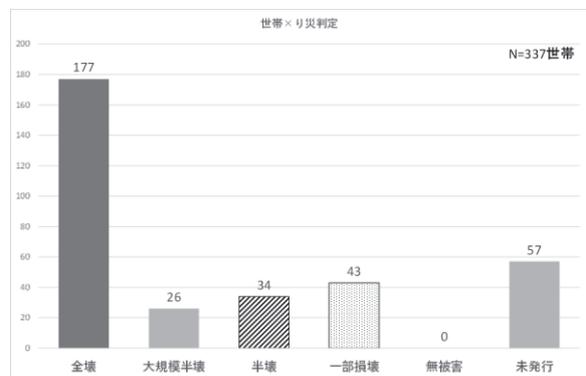


図21 避難世帯における居宅の被害状況

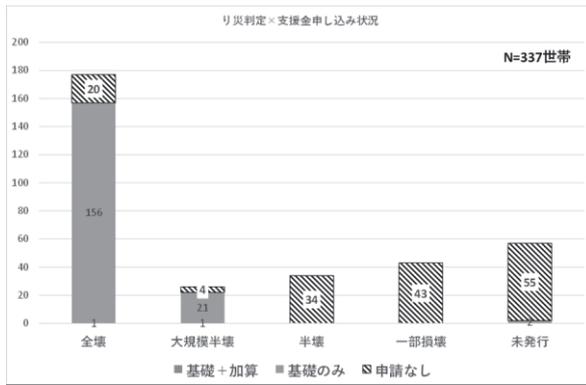


図22 生活再建支援金の申し込み状況

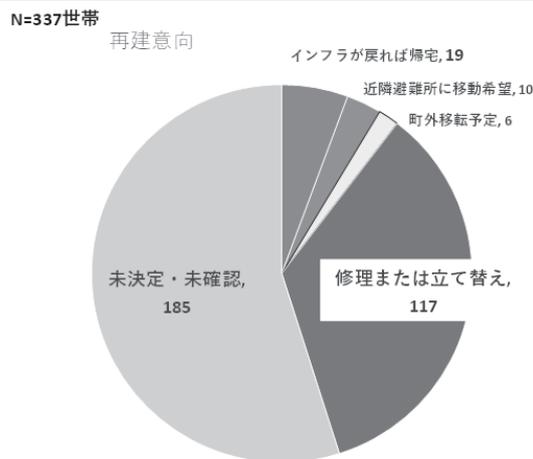


図23 避難世帯における生活再建意向

生活再建のめどは立っているか、直接避難者に尋ねたところ、修理または建て替えを希望している世帯が最も多かった(34.7%)。インフラが戻れば帰宅、町外に移転予定という程度目途を持った被災世帯がいることがわかった。しかし最も多かったのは、再建の意向を未決定または未確認の世帯であり、全体の54.5%を占めた。また、近隣避難所に移動希望を持っている世帯もいることがわかった(図23)。

生活再建支援金の加算支援金の申し込みが少ない現状についてふまえた上で、被災世帯の再建意向の構築への支援を重点的に実施する必要性あることがわかった。同時に「再建目途の構築」に障がいとなっている事項の洗い出しが必要であることが明らかになった。

(5) 今後に向けて

熊本地震は、熊本県において二桁を超える

自治体に対し、被害を発生させた。一方、それらの自治体の地域特性は一樣ではなく、都市部から中山間地域まで、影響が広がっている。南海トラフの巨大地震のように今後広域かつ複合的に被害が発生することが予測されている災害への教訓を大いに学ぶべき災害であると位置づけられる。

現在の継続する避難生活から仮住まい生活への移行、復興の様子等を、社会素因による被災救援、地域社会に係る影響の観点から引き続き、調査・分析し、今後の対応に活かすことが必要である。

本調査研究は、以下のメンバーにより実施された：田村圭子*、木村玲欧**、井ノ口宗成*** (* 新潟大学 危機管理本部危機管理室、** 兵庫県立大学 大学院環境人間学研究科、*** 静岡大学 情報学部 行動情報学科)

7. 熊本地震における深部静脈血栓症(エコノミークラス症候群)の発生状況と医療活動の調査

(1) はじめに

車中泊が5万人ともいわれた新潟県中越地震では発災後2週間以内に少なくとも肺塞栓症(PE)が10人(内5人が死亡)と報告されている。家屋の倒壊での直接的な圧死をのぞけば、肺塞栓症(エコノミークラス症候群)による死亡は、震災関連死の死因の内、最多であると思われる。よって車中泊が多いとされる熊本地震においても深部静脈血栓症(DVT)から致命的な肺塞栓症の発生が危惧される。

(2) 目的

熊本地震における深部静脈血栓症に対する医療活動について調査を行い、熊本地震における深部静脈血栓症の発生状況と問題点について明らかにすることを目的として本研究調査を行った。

(3) 方法

熊本地震が発災した平成28年4月14日(M6.5, 最大震度7)から平成28年6月13日までに熊本において発生した入院を必要とした「エ

エコミークラス症候群」の発生数とその継時的発生数,予防,啓発活動の開始時期とその予防効果について検討した。

(4) 結果

発災当初より各避難所ではエコミークラス症候群の注意喚起,弾性ストッキングの配布等がおこなわれていたとのことであったが,車中泊被災者は避難所に訪れていない場合が多く,その予防活動は限定的であった。実際には発災後,特に 4 月 16 日におきた本震 (M7.3,最大震度 7)の地震により車中泊は著増したものと考えられる (図 24)。



図 24

熊本地震においてエコミークラス症候群の原因となる深部静脈血栓症 (DVT) に対する組織的な活動が始まったのは,震災後 5 日目の 4 月 19 日からであった。日本循環器学会等が協力学会となって熊本地震血栓症予防プロジェクト (KEEP project) により,被害の大きかった益城町を中心に第一次スクリーニングで 17 日間,延べ 65 か所で 2023 名,第二次スクリーニングが 23 日間,延べ 38 か所 372 名に下肢超音波エコーがおこなわれた。一次スクリーニングでは 2023 名中 185 名 (9.1%) に DVT を認めた。また検診では DVT 予防の啓発活動 (図 25), 既往症や生活状況のアンケートも行われた。

統計学的解析の結果,地震後眠剤使用,年齢 (70 歳以上),下肢腫脹が DVT の危険因子であった。DVT と診断された患者は,地域の病院に受診をするよう勧め,必要であれば抗凝固剤などの内服加療が行われた。熊本県庁のまとめによると入院を必要としたエコミークラス症候群は 51 名でそのうち車中泊は 42 名であった。そのピークは本震の翌日である

17 日であり,その後,徐々に減少した (図 26)。

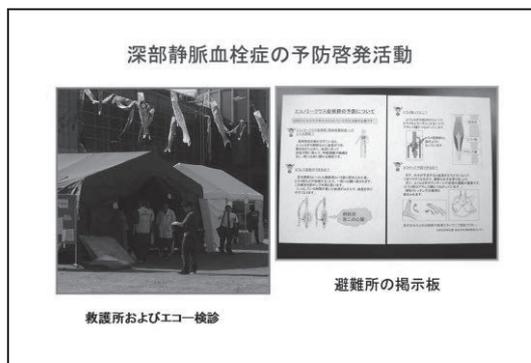


図 25

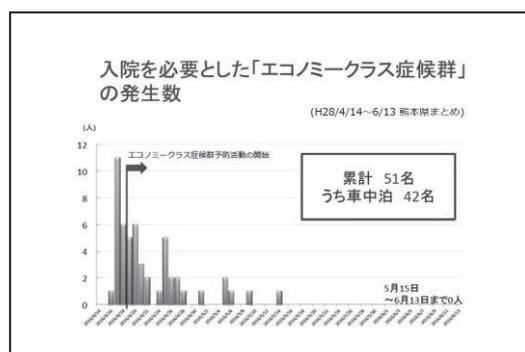


図 26

(5) 考察

図 26 に示すようにエコミークラス症候群での入院数は K E E P project の活動が開始される前にピークがありより早期に行われることが望まれる。しかしながら 5 月 15 日以降は入院を必要としたエコミークラス症候群の患者は認めず,血栓予防プロジェクトがその発生を予防したのではないかと考えられた。DVT の危険因子としては高齢,眠剤使用,下肢腫脹であった。眠剤による活動性の低下が DVT の原因となった可能性がある。

(6) 結語

阪神淡路大震災,東北大震災という巨大災害を経験し,震災に対する,DMAT 等の災害支援体制,予想される深部静脈血栓症(エコミークラス症候群)への対策は以前よりも早期にかつ組織的に行われるようになってきている。得られた教訓をもとにさらなる円滑な防災と医療体制の整備が今後も必要である。

本調査は,前原喜彦,赤星朋比古 (いずれも

九州大学消化器・総合外科)によって実施された。

8. おわりに

本震発生直後から実施した変動地形学的調査や GNSS 等による地殻変動観測,余震観測,強震動観測などから,2016 年熊本地震を引き起こした地表地震断層および地下の震源断層の特徴が明らかになった。いずれの調査観測結果も熊本地震が布田川・日奈久断層帯の右横ずれ運動によって発生したことを示しているが,詳細に見ると,推定される断層は調査手法によって異なっており,複数の断層面と複雑な断層形状を持つ活動であることが明らかになった。今後は,これらの結果を統合的に説明する震源モデルを考えるとともに,熊本地震の地震学的な全体像を明らかにする必要がある。

地震災害に関しては,建物被害や斜面崩壊の実態が明らかにされ,それらの地盤・地層構造および地震応答等との関係について検討が行われたが,解析をさらに進め,これらの発生要因の詳細を明らかにする必要がある。また,災害情報や災害過程,被災救援などについての調査研究が行われ,広域複合災害について多くの教訓を得たが,引き続き社会素因による被災救援,地域社会に係る影響の観点から調査・分析を進め,今後の復興や将来の地震災害対応に活かすことが必要である。さらに,避難時の車中泊などによるエコノミークラス症候群の調査が実施され,熊本地震血栓症予防プロジェクトの有効性と早期対応の必要性が確認されたことも,今後の対応に活かされるべきである。

謝 辞

調査および観測の実施に際しては,熊本県をはじめ関係の自治体等に多大な協力をいただいた。震源破壊過程の解析には,国立研究開発法人防災科学技術研究所強震観測網 K-NET, KiK-net, 広帯域地震観測網 F-net, 気象庁の強震波形記録を使用した。また,地すべり発生機構の現地調査および土質試験には防災科研・酒井直樹氏,新潟大学・Bhoopendra Dabycharun 氏,国際斜面災害研究機構・佐々

恭二氏・Dang Khang 氏の協力を得た。上記機関および関係の皆様記して感謝する。

なお,本調査研究は,科学研究費補助金(特別研究促進費)「2016 年熊本地震と関連する活動に関する総合調査」(代表:清水 洋)により実施されたが,本研究の一部(リアルタイム地震被害推定システムの研究)については,総合科学技術・イノベーション会議の SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理人:JST)を使用した。

参考文献

- 岡田成幸・高井伸雄(1999):地震被害調査のための建物分類と破壊パターン,日本建築学会構造計論文集,第524号,pp.65-72.
- 北村和輝(2014):伊豆大島近海地震(1978)により発生した斜面災害の広域的分布の再現,平成25年度群馬大学工学部社会環境デザイン工学科卒業論文,pp.10-11.
- 気象庁(2016):平成28年熊本地震(8月12日現在),http://www.jma.go.jp/jma/menu/h28_kumamoto_jishin_menu.html
- 九州大学大学院理学研究院・京都大学防災研究所・2016年熊本地震合同地震観測グループ,2016年熊本地震の活動について(序報)(2016),地震予知連絡会会報第96巻(印刷中)
- 熊本県(2016):平成28年熊本地震に関する災害対策本部会議資料,
http://www.pref.kumamoto.jp/kiji_15459.html
- 蔵下英司・酒井慎一・加藤愛太郎・飯高隆・岩崎貴哉・平田直(東大地震研)・2016年熊本地震合同地震観測グループ,(2016),2016年熊本地震震源域における稠密余震観測,日本地震学会2016年秋季大会講演予稿集(印刷中)
- 国土交通省 国土地理院:平成28年熊本地震の震源断層モデル(暫定)
- 国土交通省 国土地理院:地理院地図,
<http://maps.gsi.go.jp/>(2016年6月16日確認)
- 小林広明・額綱一起・三宅弘恵,2016.強震,遠地,測地データのジョイントインバージョンによる2016年熊本地震の震源過程,日本地球惑星科学連合2016年大会,MIS34-P65.
- 高井伸雄・岡田成幸:地震被害調査のための鉄筋コンクリート造建物の破壊パターン

分類,日本建築学会構造計論文集,第549号,pp.67-74,2001.11

- 田中信也・菅原正晴・工藤一嘉・重藤迪子・神野達夫:2016年熊本地震の地表地震断層近傍における建物被害調査と臨時余震観測ー熊本県益城町下陳地区を中心としてー,日本地震工学会2016年年次大会(投稿済み)
- 福岡浩(2016):平成28年熊本地震による土砂災害の予備現地調査速報(平成28年4月25日),新潟県調査速報会資料
- 防災科学技術研究所,高感度地震観測網(Hi-net),<http://www.hinet.bosai.go.jp/?LANG=ja>
- Aizawa, K. et al. Seismicity controlled by resistivity structure: the 2016 Kumamoto earthquakes, Kyushu Island, Japan (2016), submitted to Earth, Planets and Space.
- Koketsu, K., H. Miyake, H. Kobayashi, S. Yun, 2016. Concentrated Ground Motion Distribution Due to Diagonal Rupture Propagation during the Mw 7.0 Event of the 2016 Kumamoto, Japan, Earthquakes, 2016 AGU Fall Meeting, submitted.
- Wakai, A. and Ugai, K. (2004) : A simple constitutive model for the seismic analysis of slopes and its applications, Soils and Foundations, Vol.44, No.4, pp.83-97.