3.2 断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造の解明のための調査観測

3.2-1 地殻構造の解明のための地震、電磁気等による調査観測

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造の解明のための調査観測

(b) 担当者

所属機関	役職	J	氏名
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	教授	清水	洋
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	准教授	松本	聡
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	准教授	松島	健
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	准教授	相澤	広記
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	テクニカルスタッフ	塚島	祐子
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	大学院生	神薗	めぐみ
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	学術研究員	志藤	あずさ
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	学術研究員	千葉	慶太
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	技術専門職員	内田	和也
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	大学院生	塚本	香織
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	大学院生	光岡	郁穂
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	大学院生	村松	弾
国立大学法人京都大学防災研究所	助教	山下	裕亮

(c) 業務の目的

平成 28 年熊本地震の地球物理学的特徴をまとめ、同地震の背景と地震像を明らかにす る。また、熊本地震の発生域を含む布田川・日奈久断層帯の地殻構造と起震応力場を解明 することを目的として、断層帯周辺において自然地震・電磁気探査(MT 比抵抗探査)、人 工地震探査等の調査観測を実施する。これらの結果に加え、サブテーマ2-2で得られる断 層帯周辺のひずみ場の情報、およびサブテーマ1で得られる地形・地質学的情報をもとに、 布田川・日奈久断層帯において想定される震源断層モデルについて検討し、サブテーマ3 の強震動評価への寄与をめざす。

(d) 3 ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成 28 年度:

平成 28 年熊本地震の発生域を含む九州内陸における既存の地球物理学的観測データを 収集・解析して、布田川断層帯および日奈久断層帯で発生する内陸地震の発生場に関する 情報を整理し、平成 28 年熊本地震発生の地震学的背景や同断層帯周辺の地震発生ポテンシ ャルについての知見を得た。また、平成 28 年熊本地震の余震観測を実施して、同地震の震 源断層の特徴を明らかにした。さらに、熊本平野を南北に縦断する測線において反射法地 震探査を実施して、同地域の地下構造を明らかにし、布田川断層断層帯宇土区間における 活断層の存在の有無を含め位置・形状の把握を試みた。

2) 平成 29 年度:

平成28年熊本地震の活動域を含む布田川・日奈久断層帯周辺域において、平成28年度 に引き続き自然地震観測を継続するとともに、日奈久断層を横切る測線における繰り返し GNSS 観測を実施して、平成29年に入っても地震活動が続いている熊本地震の活動推移を 把握した。これらの観測データに基づいて、布田川・日奈久断層帯およびその周辺域の高 分解能の地殻応力場と深部地殻構造を明らかにした。特に、地殻応力場については、熊本 地震の発生前後の起震応力の時間的空間的変化を検出した。なお、平成28年度に実施した 反射法地震探査と自然地震の解析結果に基づき、布田川断層帯宇土区間で想定される地震 の震源断層の推定を試みたが、妥当性の高い震源断層の推定は困難であり、引き続き平成 30年度もデータ解析を継続して検討を行うことにした。

さらに、平成 30 年度に実施を予定している MT 法比抵抗探査について、地震活動や反射 法地震探査の結果を踏まえて具体的な観測計画を作成し、探査の準備を行った。

3) 平成 30 年度:

布田川・日奈久断層帯において MT 法探査を実施して比抵抗構造を明らかし、平成 29 年 度までに得られた当該地域の地震学的構造と統合して地設構造モデルを作成した。この地 設構造モデルと、地殻応力分布やサブテーマ2-2によるひずみ分布などの力学的場の情報、 およびサブテーマ1による地形・地質学的情報などに基づき、布田川・日奈久断層帯で想 定される震源断層モデルを全サブテーマ共同で検討した。これらにより、サブテーマ2の 観測・解析結果を震源断層モデルの断層パラメータに反映させた。

(2) 平成 28~30 年度の成果

(a) 業務の要約

平成28年熊本地震(以下、熊本地震とよぶ)の稠密地震観測とGNSS繰り返し観測を実施して、熊本地震の震源の特徴を明らかにするとともに、布田川・日奈久断層帯を含む九州内陸におけるこれまでの地震学的観測データと電磁気学的観測データを収集・解析して、 熊本地震を引き起こした背景や、当該地域の地震発生ポテンシャルについて知見を得た。 これらの成果により、布田川・日奈久断層帯の震源断層モデルの作成に寄与した。

地震観測については、熊本地震の震源構造と震源域の地殻構造、および起震応力の時間 的空間的変化の特徴をまとめ、最大前震および本震の破壊開始点付近の複雑な断層構造を 明らかにした。また、熊本地震発生以前の背景地震活動の深さ分布や起震応力の空間分布 から、熊本地震の本震の震源断層の幅(下端)やすべり方向を推定可能であることが示さ れた。さらに、熊本平野において、布田川断層帯宇土区間が通過していると推定される地 帯を南北に縦断する測線を設定して反射法地震探査を平成28年度に実施し、当該地域の地 下構造と布田川断層帯宇土区間における伏在断層の位置・形状などを調査した。

地殻変動観測については、日奈久断層帯・高野-白旗区間を横切る測線において繰り返 し GNSS 観測を実施した。その結果、震源断層南西端近傍における地殻変動の熊本地震発生 前からの推移が高い空間分解能で明らかになり、高野-白旗区間の本震発生以降の断層すべりは、GNSS 測線の北側に留まっていることが示された。

MT 法比抵抗探査については、これまでさまざまな機関により蓄積されてきた広帯域 MT データを再解析し、周期 0.01~2000 秒の周波数応答関数をコンパイルした。熊本地震震源 域においては、80 観測点のデータを入力とした 3 次元解析を行った。これらの結果を踏ま え、平成 30 年度に宇土半島、日奈久断層帯周辺および熊本平野において広帯域 MT 調査を 実施して、布田川・日奈久断層帯の深部比抵抗構造を明らかにした。さらに、布田川断層 帯においては、浅部比抵抗構造探査も実施して、熊本地震による断層変位量と比抵抗構造 の関係を調査した。

(b) 業務の成果

1) 熊本地震発生の背景の調査

熊本地震や九州におけるその他の内陸地震についてのこれまでの研究をレビューし、当 該地域の内陸地震の起震応力場、地震活動、地震波速度構造の特徴から熊本地震の発生の 地震学的背景について考察した。このうち、起震応力場については Matsumoto et al. (2015) により求められている(図1)。これによると、熊本地震の震源域周辺においては水平最大 圧縮応力と垂直応力成分が近い値を示すことから、正断層と横ずれ断層がどちらも起こり うる場である。このような応力場の中で、正断層と横ずれ断層のいずれになるかを規定す るのは応力場に対する断層の走向・傾斜角である。日奈久断層帯においては断層の走向が 最大圧縮軸とほぼ 45 度をなし、傾斜が 60 度以上と高角であるため横ずれが、また、布田 川断層帯に対しては最小圧縮軸が断層の走向に対してほぼ垂直に近いことから正断層のす べりが発生しやすい場となる。これは、熊本地震の前震・本震・余震の発震機構と概ね調 和的であり、一連の地震が当該地域の応力場を反映していることが示された。

また、熊本地震は九州内陸部で最も地震活動が活発な領域で発生したことが大きな特徴 であった。Matsumoto et al. (2016)は、地震のモーメントテンソルから地震で解放された 非弾性ひずみを見積もり、その高ひずみ域(ひずみ速度が 10⁻⁸/年を超える領域)の端で今 回の地震が発生したことを示した(図2)。これは、非弾性ひずみが大きな領域は応力を支 えることができないため、その周辺で応力が高まったことが地震発生に寄与した可能性を 示している。

441



図1 九州地域の応力場(Matsumoto et al., 2015 による)。左図が主圧縮軸方向、右図 は応力比を示す。図中には、活断層のトレースも紫色の線で示している。本節「3.2-1 地殻構造の解明のための地震、電磁気等による調査観測」のすべての図における活断 層トレースは、活断層研究会編「新編日本の活断層」(1991)によるものである。



図 2 九州における地震発生層の地震によって解放された非弾性ひずみ分布 (Matsumoto et al., 2016)。カラースケールは最大せん断ひずみ率を示す。丸は M5.5 以上の地震の震央であり、そのうち赤丸は内陸地震を示す。

2) MT 探査データの収集と解析に基づく地震発生ポテンシャルの推定

Aizawa et al. (2017)は、熊本地震の活発な余震活動・誘発地震活動と比抵抗構造との対応について、平成28年度までに得られた247点の広帯域MTデータをコンパイルし検討した。その結果、地震活動は低比抵抗体の周辺、やや高比抵抗寄りで発生していることが明らかになった(図3)。1975年1月23日の阿蘇北部地震(MJMA6.1)、4月21日の大分県西部地震(MJMA6.4)の震源も同様に低比抵抗体の周辺部に位置していた。これら比抵抗構造と 震源の関係は、過去の内陸地震発生域で行われた比抵抗構造研究の結果(e.g., Yoshimura et al., 2008; Ichihara et al., 2014)と同様であり、比抵抗構造から地震発生の可能性が相対的に高い地域を予測できる可能性を示している。



130.4° 130.6° 130.8° 131° 131.2° 131.4° 131.6°

図3 1次元解析により推定した比抵抗構造(深さ8km)と熊本地震後1か月間に発生 した地震(黒丸)との関係(Aizawa et al., 2017による)。

3) 稠密地震観測と高精度震源決定による熊本地震の震源断層構造の調査

熊本地震について、詳細な震源断層構造を明らかにするため、震源再決定を行った。震源 再決定には、定常観測点のデータに加え、地震発生前より九州大学が震源域周辺で実施し ていた臨時観測点データと、地震発生後に行われた2016年熊本地震合同地震観測グループ による緊急余震観測のデータを用いた。データの期間は1993年から2016年12月までである。 これらのデータを用いてDouble-difference tomography法による構造推定・震源決定プロ グラムを用いて震源決定を行った。地震波速度構造は、平成28年度の震源決定では、熊本 地震発生以前の観測データに基づくSaiga et al. (2010)による3次元地震波速度構造を用 いたが、熊本地震の観測データも含めた地震波トモグラフィーにより布田川・日奈久断層 帯の詳細な3次元地震波速度構造が得られたため(Shito et al, 2017)、平成29年度には Shito et al. (2017)による構造を用いて震源再決定を行い、さらに精度の高い震源分布を 得た。



図4 熊本地震の高精度震源分布(Mitsuoka et al., 2018による)。 上段は最大前震(4月14日M6.5)~本震(4月16日M7.3)の期間、下段は本震以降の震源 をそれぞれ示している。上下段それぞれで左図は、震央分布と右図の断面の位置を示す。 右図は、左図中のA1~A12に沿った断面図である。図中の青星、赤星は最大前震、本震の 震源位置を示す。図中にカラーで示した矩形や線は、図5に示される、熊本地震の震源断 層モデルである。



図5 震源分布から推定された熊本地震の震源断層面(Mitsuoka et al., 2018 による)。 色つきの四角形が震源断層面を表す。震源断層面の上端を太線で示している。

この震源再決定により得られた震源分布を図4に示す。日奈久断層帯側は西北西側に傾 斜した面が明瞭に見られる。また、布田川断層帯側では地震活動が低く、特に本震の地震 時に大きくすべった領域(e.g., Asano and Iwata, 2016)では余震活動が不活発であるこ となどの大きな特徴がみられる(断面図A1, A2)。やや不明瞭ではあるが、震源分布か ら布田川断層帯に対応する断層面を推定可能である(図4のA1~A4断面)。また、最大 前震と本震の震源はいずれも、走向は日奈久断層帯とほぼ同じ(NNE-SSW)であるが傾斜方 向が日奈久断層帯と逆(東南東傾斜)の断層面上にある(図5のA5~A6断面)。これら の面状構造は、より分解能が高い3次元速度構造を震源再決定に用いたことによって明ら かになったものである。これらの震源分布から推定される震源断層モデル(Mitsuoka et a 1., 2018)を図5に示す。推定された震源断層面の特徴とAsano and Iwata(2016)のすべり 分布から、熊本地震の破壊過程として以下のことが推定される。

i)最大前震は、日奈久断層帯とほぼ同じ走向であるが東南東傾斜の断層(図5中の Hin agu 2)から破壊が始まり、西北西傾斜の断層(日奈久断層帯, Hinagu 1)へ広がった。

ii)本震は、日奈久断層帯深部の東南東傾斜(Hinagu 3)から破壊が開始し、布田川断 層帯と日奈久断層帯北東部に対応する断層面(Hinagu 1, Futagawa)で大きなすべりを 起こした。

図4を見ると、さらにこれら以外にも複数の面状分布やクラスタが存在しており、震源 断層は非常に複雑な構造をしていると推定される。

4) 熊本地震の震源断層域の地殻構造と応力場の調査

熊本地震について、震源断層と地殻応力場や地殻構造の関係を明らかにするため、平成 28 年度および 29 年度に、地殻構造や起震応力場の解析を行った。

地殻構造については、地震波トモグラフィー解析と MT 法比抵抗解析を行い、震源分布と の比較を行った。速度構造については、Shito et al. (2017)の結果をもとに考察を進めた。 図6に解析領域(熊本周辺)を示す(Shito et al., 2017より引用)。図7には図6のa-a' -a', b-b'に沿った地震波速度トモグラフィー解析の結果の鉛直断面を示す (Shito et al., 2017)。地震波速度構造は、熊本地震発生前(1996年1月)から 2016年8月の間 に解析領域内で発生したマグニチュード1以上(九州大学地震火山観測研究センターでル ーチン処理により求められたマグニチュード)、深さ 30km以浅の震源データをもとに求 められた (Shito et al., 2017)。速度構造は、水平方向5kmごと、深さ方向には2.5km ごとにグリッドを配置し、Double-difference tomography 法 (Zhang and Thuber, 2003) を用いて推定した(詳細については Shito et al., 2017 参照)。地震波速度分布と震源分 布の比較から、熊本地震発生前(背景)の活動も熊本地震の活動も低速度・高 Vp/Vs 域(図 7の赤色の領域)を避けて発生していることがわかる。また、熊本地震の本震時の大すべ り域は、地震波速度分布とははっきりとした対応はなく、速度が中庸な領域となっている。 ただし、大すべり域の下限(最深部)は、背景の地震活動の下限とほぼ対応していること がわかる。このことは、大地震が発生する前の背景の地震活動の分布域の下限(D95)か ら震源断層の幅を推定する手法が妥当であることを示している。本震の破壊の開始点(図 中の大きい☆)は比較的低速度の領域に位置している。一方、熊本地震以前の地震活動と この地域で発生した規模の大きな地震の破壊の開始点についてみると、比較的活動の低調 な部分から破壊が始まっているように見える。これは、今後精査する必要はあるものの、 震源断層モデルを構築するうえで重要な情報であると考えられる。

447



図6 地震波速度トモグラフィーの解析領域(Shito et al., 2017 に加筆)。図中の黄色 枠が解析領域を示す。図中の☆印は解析領域で発生した 2016 年 4 月 14 日(M6.5)、4 月 15 日(M6.4)、4 月 16 日(M7.3)および、2000 年に発生した M5.0 の震央を示している。図中 の灰色丸、黒丸は M6.5 発生前後の震央分布、青三角は地震観測点、赤三角は活火山、白線 は活断層、赤線は阿蘇カルデラの輪郭示す。



図7 地震波トモグラフィーによる3次元地震波速度構造(Shito et al., 2017による) (a)は、1996年1月以降、熊本地震発生以前の地震活動と速度構造を重ねたもの。

- (b) は、最大前震(2016年4月14日M6.5)以降に発生した地震の震源分布と速度構造 を重ねたもの。
- (a)、(b) いずれも上段が P 波速度 (Vp)、中段が S 波速度 (Vs)、下段が Vp/Vs。

また、図6で示された地震の位置を星印で、Asano and Iwata (2016) による本震時の大 すべり域をコンターでそれぞれ示す。

応力場については、布田川・日奈久断層帯周辺における背景の地震活動から起震応力の 空間分布を求めた。その結果、布田川・日奈久断層帯においては応力場が場所によって変 化する、不均質な応力場が推定された。一般に、地震断層面と応力場がわかると、その断 層面上でのすべりが最大せん断応力の方向を向くことが期待できる。そのため、熊本地震 の本震の震源断層面での最適すべり方向を推定した。その結果を Asano and Iwata(2016) が強震波形解析から推定した、実際の熊本地震の時のすべり分布と比較したところ、断層 面上のすべり方向は概ね一致することが確かめられた。以上のことから、あらかじめ想定 震源断層の走向・傾斜を精度良く仮定できれば、背景の地震活動の応力解析から、本震時

のすべり方向を事前に推定できる可能性があることがわかった。一方、一般には地震断層 面は応力場に対して最もすべりやすい面(最適面)であるとは限らない。もし、地震断層 が最適面でない場合はすべりを起こしにくい。しかしながら、断層面上での間隙流体圧が 高い場合にはせん断破壊強度が低下することで、すべりが起こりやすくなる。熊本地震の 地震時すべりは応力場とは無関係に、強震動記録から求められている。そのため、地震時 の断層上のすべり方向と微小地震から推定された応力場の関係を見ることができる。先に 述べたように、地震断層およびその周辺では応力場が空間的に変化することが明らかにな っている。このため、推定された応力場と地震断層面との幾何学的関係を考える。図8に は Matsumoto et al. (2018)によって求められた応力場と地震断層の関係を M7.3の断層に 沿った鉛直断面で示している。応力場に対して地震断層が、最適面の場合を青、そこから ずれるに従って暖色になるコンターで示している。表示の単位は最大せん断応力で規格化 された超過間隙流体圧として表現している。同時に、Asano and Iwata (2016)による地震 時のすべり方向と大きさを示している。図から、すべりの大きい場所は比較的最適面に近 い部分が多い。しかしながら、断層深部を見ると、赤い領域でも大きいすべりが起こり、 急激にすべりが小さくなっているようにも見える。これは、間隙流体圧が高いためにすべ りを起こすことが可能であったが、もともと強度が高い(最適ではない面)ために、減速・ 停止に至ったとも考えられる。つまり、大すべり域の北東側では、断層面の破壊強度が小 さかったためすべることができたが、最適面ではないため、すべりが減速して停止したこ とを示唆する。



図8 応力場から推定される最適面と地震断層面の比較(Matsumoto et al., 2018 による) 応力場に対する最適面(摩擦係数=0.6 を仮定)と地震断層面の差異を最大せん断応力で 規格化された超過間隙流体圧としてカラーコンターで示すとともに、値は図5に示された 走向に沿う鉛直面に投影している。強震動インバージョンによって推定された本震時のす べり角とすべり量を実線で示す。青色は地震断層の応力場最適面に対する一致度が高い領 域、赤色は不一致度が大きい領域である。図中の星印は、本震の震源(破壊の開始地点) を示す。

さらに、熊本地震の本震発生以降の起震応力の空間分布を余震の応力テンソルインバー ジョンから推定し、熊本地震以前の背景の応力場と比較した(図9)。図9の上段は熊本地 震前後における深さ5~10kmの応力場の変化を、下段は深さ10~15kmの応力場の変化を それぞれ示している。また、左のパネルは熊本地震発生前、右のパネルは熊本地震の本震 後を図示している。布田川・日奈久断層帯近傍の応力場は、横ずれ断層型や正断層型が混 在しているが、熊本地震発生以降は浅い領域、深い領域ともに正断層型が卓越する傾向が 認められる。Asano and Iwata (2016)のすべり分布を基に、応力変化を求めた。地震前後 に応力場のパターンが変化した地点では、地震時の応力変化は数+MPa以下である。地震 前後の応力場が地震発生によって変化したという観測結果は、この地域の差応力が数+ MPa 以下であることを意味していると考えられる(松本・他, 2018)。



図9 熊本地震前後の起震応力場の変化(松本・他,2018による) 上段は、深さ5~10kmにおける起震応力場、下段は深さ10~15kmの起震応力場をそれぞ れ震源球(下半球等積投影)で示す。震源球の色はカラースケールで示した応力推定の精 度(暖色ほど精度が高い)を表す。ここでの精度は90%の信頼区間をテンソル差として表 している。同時にテンソル差から求められる応力軸の回転がもっとも大きくなる場合を例 に記している。

5) 日奈久断層帯を横切る測線における GNSS 繰り返し観測による地殻変動の調査 熊本地震の震源断層モデルの構築、および熊本地震の本震時には未破壊だった日奈久断層 帯日奈久区間への断層すべりの進展の有無などを把握するため、日奈久断層帯の高野-白旗 区間と日奈久区間の境界付近を横断する測線において、GNSS の繰り返し観測を実施した。 この測線は、益城町付近で2000年6月に発生したM5.0の地震後に九州大学が日奈久断層 帯の活動のモニタリング用に設置したものであり、熊本地震の発生前には 2010 年2月に測 定していた。2000年から2010年の結果では、検出限界を超える大きさの日奈久断層帯の 地殻変動は観測されていなかった。熊本地震の発生後は、本震の1週間後の 2016 年4月 23日から4月27日に測定を実施して、若干の2010年2月以降の変動や本震直後の余効変 動も含むと考えられるものの本震発生に伴う coseismic な地殻変動を、震源断層の南西端 近傍で捉えることに成功した(図 10、松島・他,2016)。これによると、変位ベクトルは、 断層帯に近づくにつれて、その大きさが小さくなっており、震源断層の南西端付近におい ては、断層上端は地表に達していないことが分かった。また、日奈久断層帯の地表トレー ス付近の GNSS 測線上で、西から東に行くにつれて変位ベクトルの向きが時計回りに回転し ていることなどの特徴から、本震時の断層モデルを提出した(図11、松島・他,2016)。そ のモデルは、国土地理院が InSAR などの観測データから提出している日奈久断層帯高野-白旗区間の震源断層モデル(矢来・他,2016)よりも北東に2km、南西に1km 延びており、 長さ 13.2km であると推定されること、また、震源断層の南西端は GNSS 測線までは達して おらず、高野-白旗区間と日奈久区間の境界より3km 程度北東側に留まっていることが明 らかになった(表1、松島・他,2016)。



図 10 日奈久断層帯の高野-白旗区間と日奈久区間の境界部を横断する測線における GNSS 繰り返し点および GEONET の観測点分布(松島・他,2016より)。熊本地震にともなう地表の変位ベクトルを活断層トレース(活断層研究会,1991)および九大地震火山センターの通常解析で決定された余震分布(4月14~29日)と重ねて表示している。余震分布の円の大きさはマグニチュード、色は深さを示す。



図 11 断層モデルとそれから計算される変位と GNSS 観測値の比較。

a) 国土地理院の断層モデル(矢来・他, 2016)。A2 断層は阿蘇地域に存在し、領域外になっている。

b) GNSS 観測値と推定値が最も一致するように改良した断層モデル。観測ラインに近い B 断層のパラメータのみ変更し、A 断層については国土地理院推定のパラメータを変更して いない。B 断層については、国土地理院推定よりさらに北北東に 2 km、南南西に 1 km 延び ていると推定された。

c)とd)国土地理院のB断層モデルの南南西端の位置を変更させた場合のGNSS推定値と 観測値の比較(松島・他,2016)。 表1 国土地理院(矢来・他,2016)の断層パラメータと松島・他(2016)で改良された 断層パラメータの比較

	経度 [度]	緯度 [度]	上端深さ [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [km]	傾斜 [度]	滑り角 [度]	滑り量 [m]	Mw
断層A1	130.996	32.878	0.6	20.0	12.5	235	60	209	4.1	6.96
断層A2	130.975	32.883	0.2	5.1	6.6	56	62	178	3.8	6.36
断層B1	130.807	32.770	0.8	5.0	13.0	205	72	176	2.7	6.45
断層B2	130.784	32.729	0.8	5.2	13.0	205	72	176	2.7	6.46

国土地理院断層モデル

改良断層モデル

	経度 [度]	緯度 [度]	上端深さ [km]	長さ [km]	幅 [km]	走向 [km]	傾斜 [度]	滑り角 [度]	滑り量 [m]	Mw
断層A1	130.996	32.878	0.6	20.0	12.5	235	60	209	4.1	6.96
断層A2	130.975	32.883	0.2	5.1	6.6	56	62	178	3.8	6.36
断層B1	130.816	32.785	0.8	7.0	13.0	205	72	176	2.7	6.54
断層B2	130.784	32.729	0.8	6.2	13.0	205	72	176	2.7	6.51

本研究では、断層変位が今後さらに南西方向に伸展する可能性を考慮して、日奈久区間 を横断する測線を新たに設置し測定を実施した(表2)。また、高野-白旗区間と日奈久区間 の境界部を横断する測線での再測を平成29年度(2017年7月5日~7月9日)に実施し て、熊本地震発生後約1年間の地殻変動を明らかにした(表3)。表4に観測諸元を示す す。各地点の座標推定には米 JPL が開発した GIPSY-OASYS ver6.5の精密単独測位法を用い、 暦には IGS の最終精密暦を使った。図 12 と図 13 に熊本地震後の変位ベクトルを示す。座 標の基準は国際地球基準座標系(ITRF2014)準拠となっている。図13をみると、熊本地震 の1年後も余効変動が依然として継続していることがわかる。また、このような余効変動 の特徴は、国土地理院による GEONET の観測結果とも調和的である。しかし、注意深く見る と、本震に伴う変動と余効変動では変位ベクトルの方向の転換地点に違いが見られる。す なわち、本震時の変動(図10)では、KM05とKM06の間で方向が変わっているのに対し、 余効変動(図12、図13)では KM04 と KM05 の間で変化しているようにみえる。この地域の 定常的な地殻変動として反時計回りの変位が重畳していること、観測されたベクトルが小 さくて S/N 比が悪いことなどから、慎重な検討が必要であるが、もしこの違いが事実であ るとすれば、地震時に比べて余効変動は北西傾斜の断層の深部がすべっている可能性があ る。また、断層帯の両側の観測点の変位ベクトルに明瞭な左横ずれの食い違いパターンが 認められず、断層帯の走向と変位ベクトルの向きが直交に近いことから、熊本地震の1年 後においても、GNSS 測線の直下には、GNSS で検知される程度のすべりは発生していないと 判断される。このことから、高野-白旗区間における本震以降の断層すべり域は、GNSS 測 線の北側に留まっており、日奈久区間まで伸展していないと推定される。

観測点名	観測点地名	種別	標識		北緯			東経		標高(m)
KM01	排水機場	四等三角点	金属標識	32°	42'	44.2"	130°	36'	13.1"	6
KM02	走潟	三等三角点	石柱	32°	42'	23.4"	130°	38'	37.3"	2
KM03	花園台	九大基準点	金属標識	32°	40'	47.6"	130°	41'	20.1"	34
KM04	東谷	四等三角点	石柱	32°	39'	43.5"	130°	42'	41.9"	39
KM05	萩尾溜池	九大基準点	金属標識	32°	39'	08.1"	130°	43'	30.1"	39
KM06	豊野山崎	九大基準点	金属標識	32°	38'	47.9"	130°	44'	31.6"	82
KM07	巣林	九大基準点	金属標識	32°	38'	47.1"	130°	46'	11.6"	75
KM08	田上原	四等三角点	石柱	32°	38'	21.6"	130°	47'	16.2"	80
KM09	鶴野木橋	九大基準点	金属標識	32°	37'	12.4"	130°	49'	08.8"	98
KM10	告乗	四等三角点	金属標識	32°	37'	47.9"	130°	51'	04.4"	161
KM11	山口	四等三角点	金属標識	32°	36'	03.1"	130°	53'	25.2"	320
KM13	干拓	四等三角点	石柱	32°	36'	29.9"	130°	37'	42.4"	3
KM14	氷川大橋	四等三角点	石柱	32°	35'	33.6"	130°	38'	31.4"	5
KM15	浜無田	三等三角点	石柱	32°	34'	36.8"	130°	39'	51.7"	7
KM16	下古川	九大基準点	金属ピン	32°	34'	06.8"	130°	40'	30.7"	7
KM17	上北山王	三等三角点	石柱	32°	33'	38.7"	130°	41'	35.3"	110
KM18	立神峡	四等三角点	石柱	32°	32'	50.9"	130°	42'	19.2"	80

表 2 GNSS 観測点一覧

表3 各観測点測線の観測期間

観測点	期間
KM01~KM11	2016年4月23日~4月27日
$KM01 \sim KM11$	2016年7月3日~7月8日
KM13~KM18	2016年7月27日~8月1日
KM01~KM11	2017年7月5日~7月9日

表4 観測諸元

受信機	Trimble5700 および JAVAD SIGMA
アンテナ	Zepher Geodetic および GrAnt-G3T
アンテナ固定方法	測量用三脚
求芯方法	Leica レーザー求芯器使用
受信周波数	GPS L1, L2, C1, P2
サンプリング間隔	5 秒
記録媒体	CF カードおよび内部メモリ
電源	塩化チオニールリチウム電池



図 12 熊本地震後約3ヶ月間(2016年4月~2016年7月)の余効変動量。KM13~KM18は、 本研究で新たに設置した日奈久区間の測定点を示すが、まだ1回しか測定が実施されてい ないので、変位量ベクトルは記載されていない。



図13 熊本地震後の1年間(2016年7月~2017年7月)の余効変動ベクトル。

6) 熊本平野における反射法地震探査

熊本平野西部を南北に縦断する反射法地震探査を実施し、布田川断層帯宇土区間(宇土 断層)を横断することにより、宇土断層の位置及び形状の解明、熊本平野の断層帯周辺の 地下構造の把握を行った。図14に調査地域と測線の概略を示す。



図14 反射法地震探査の調査地域と測線位置。

測線は、熊本県熊本市西区谷尾崎町から熊本県宇土市立岡町に至る南北約17kmであり、 標準発震点間隔10m、標準受振点間隔20m、展開長約1.4km、P波を用いて、探査深度1km 程度をめざした。探査の仕様と使用機器を表5と写真1に、詳細な測線位置を図15にそれ ぞれ示す。







写真1 反射法地震探査で使用した機器。 左上:バイブレーター(人工震源) 右上:油圧インパクター(人工震源) 左下:受振器

表5 反射法地震探査の仕様と使用機器。

項目	内容	備考
探查手法	反射法地震探查	
波動種別	P波	
測線長	約 17 km	
標準発震点間隔	10 m	家屋等が隣接し、発震により家屋 等に大きな影響が生じるおそれ がある箇所では発震しない。
標準受振点間隔	20 m	障害物がある場合は受振器設置 位置をずらして設置。
標準収録チャンネ ル数	70 チャンネル (展開長 : 1.2km 以上)	
標準垂直重合数	10 回	現地テストに基づき決定
標準スイープ長	16 秒*)	現地テストに基づき決定
スウィープ周波数	$10\!\sim\!100 \text{Hz}$	現地テストに基づき決定
収録記録長	3秒	相互相関後
サンプリング間隔	2 msec	
収録様式	SEG-D	
震源	バイブレーター 1台 および 油圧インパクター 1台	EnviroVibe (IVI 社製) JMI-200 (地科研社製)
受振器	速度型地震計 (固有周波数:10Hz、 6個グルーピング/1地点)	SM-4(I/O Sensor 社製)
収録装置	独立型デジタルレコーダー (A/D 分解能:24 ビット)	GSR・GSX(OyoGeospace 社製) GPS 機能付独立型収録装置

*)バイブレーター震源の場合に限る



図 15 反射法地震探査の測線位置図。国土地理院発行の基盤地図に測線を重ねて示す。青線が測線、青色の数字が測点番号を示す。

波形記録のデータ処理及び解析は、共通中間点(Common Midpoint; CMP)重合法により SN 比(シグナルとノイズの比)を高めた時間断面を作成した。次に、速度解析結果等に基づき、 マイグレーション処理を施し、時間断面中の反射面を正しい位置に戻した。さらに、深度 変換により、時間断面を深度断面に変換した。測線上の受振点で得られた波形記録例(ペ ーストアップ)を図 16 に示す。また、上述のデータ処理・解析により得られた表層速度、 重合速度、時間断面、深度断面を図 17~図 22 に示す。



図 16 測点 No. 605 における発震記録。測線の両端まで初動が明瞭に追跡できるほか、反 射波などの後続波も認められる。



図 17 表層速度解析結果。







図 19 CMP 重合時間断面図。



図 20 マイグレーション時間断面図。



図 21 深度断面図(縦横比 2:1,カラー表示)。



図 22 深度断面図(縦横比 2:1, グレー表示)。



図 23 深度断面の地質解釈断面図(下段)。上段は、「地質図(熊本県地質図編纂委員会編, 2008)」に測線を重ねて表示。

図 23 は反射断面の地質解釈図である。本地震探査により、以下のような地下構造が推定 された。

【基盤岩について】

地質図(熊本県地質図編纂委員会編,2008)より、探査測線付近における基盤岩は、白亜 系堆積岩類(御船層群)や先阿蘇火山岩類(金峰山火山岩類や大岳火山岩類)などであり、 その下位には変成岩や花崗岩類などが潜在すると推定される。

反射断面の地質解釈図(図23)においては、測線北部(CMP1~CMP600付近)では金峰山火 山岩類が地表直下より分布する。測線南部のCMP2500付近以南では、白亜系堆積岩類(御 船層群)が測線近傍に露出し、地表直下より基盤岩が分布する。またCMP2500の地表直下 からCMP2200の標高-500mにかけて明瞭に追跡される反射面が、白亜系基盤岩の上面に相 当すると考えられる。しかし、CMP600~CMP2200付近では、基盤岩上面の反射面は明瞭で ない。なお、測線南部の西側には金峰山火山岩類と同じ先阿蘇火山岩類の大岳火山岩類が 地下に分布する可能性がある。

【堆積層について】

基盤岩を不整合に覆うかたちで、おもに第四系が分布する。上位より、有明粘土層などの 沖積層、Aso-1~Aso-4 などの阿蘇火砕流堆積物、および時代未詳の第四系などである。 測線付近における既存ボーリング資料をもとに柱状断面図を作成し(図 24)、阿蘇 3 (Aso3 基底)および阿蘇1火砕流堆積物の基底層準(Aso1 基底)を推定し、反射面を追跡した。そ の結果は地質解釈断面図(図23下段)に示すとおりである。また、阿蘇1火砕流堆積物の 下位には、反射面の連続性の良い堆積物が、CMP1200付近で層厚約300m確認され、図24 下段のB-B'断面に示すように、長谷・岩内(1992)の水前寺層などが相当する可能性が ある。なお、柱状断面図の作成にあたって使用した資料は、長谷・岩内(1992)、猿山(1986)、 石坂・他(1995)、熊本県環境公害部(1995)などである。

【断層構造について】

熊本県地質図(10万分の1)では、CMP200付近に立田山断層が通るが、断層構造を示す明瞭 な反射面は認められない。また、地震調査研究推進本部(2013)による布田川断層帯宇土区 間(宇土断層)は、CMP2200~CMP2400付近を通るが、白亜系基盤岩の上面に相当する反射 面が北に傾斜する構造が確認される。

一方、地質解釈図(図 23)に示すように CMP1600 付近と CMP2150 付近には、反射面の形 態より正断層系の断層が推定される。それぞれの断層の鉛直変位は、阿蘇火砕流堆積物で 数 10m程度と推定される。基盤岩上面の変形は明瞭でないものの、これらの正断層が布田 川断層帯宇土区間(宇土断層)に相当する可能性がある。



図 24 既存のボーリング資料に基づいた地質柱状断面図(下段)。上段は図 23 の上段と同 図。

7) 布田川断層帯における浅部比抵抗探査

熊本地震において、 布田川断層帯および日奈久断層帯に沿って断層すべり量が大きく、 破壊が地表付近まで達した領域(ここでは大すべり領域と記す)と断層すべり量が小さく、 破壊が地表付近までには達していない領域(同じく小すべり領域と記す)があることが報 告されている(例えば、Asano and Iwata, 2016, Kubo et al., 2016, Kobayashi et al., 2017)。すべり量が異なる2つの地域の浅部(地下1.5 km までの)比抵抗構造と、断層す べりの大きさや地表断層変位の分布との関連を明らかにすることを目的として、両地域の 2次元比抵抗構造を推定した。

大すべり領域としては熊本県上益城郡益城町を、小すべり領域として熊本県阿蘇郡西原 村を選定し、探査には地磁気地電流法(Magnetotelluric法: MT法)のうち、浅部の空間 分解能が良い AMT (Audio- frequency Magnetotelluric)法を用いた。両地域において、 布田川断層帯の地表トレースとほぼ直交するようにそれぞれ長さ約2kmの観測測線(前者 を MSK 測線、後者を NSH 測線と記す)を設定し、MSK 測線に沿っては11点で、NSH 測線に 沿っては14点で測定を行った(図25)。測定から得られた電場水平2成分、磁場水平2 成分のデータから算出した MT 応答関数を元に ABIC 最小化による平滑化拘束付き2次元比 抵抗インバージョンコード(Ogawa and Uchida, 1996)を用いて2次元比抵抗モデル(そ れぞれ MAK モデルと NSH モデルと記す)を決定した(図26)。これら2つのモデルから、 次の2つの特徴が読み取れる。

- (1) 両モデルに共通して、地表断層トレースの直下付近にほぼ鉛直な低比抵抗領域が存在す るが、その位置は NSH モデルでは MSK モデルよりも断層地表トレースに対して南側に位 置する。
- (2) MSK モデルの方が、NSH モデルよりも全般に低比抵抗であり、また、測線中央部及び北部の顕著な低比抵抗領域が浅い部分まで分布している。

特徴(1)で述べた断層下に位置する低比抵抗領域は、布田川断層帯に沿う破砕域への地下水の浸入や断層粘土によると考えられ、断層の damage zone を示すと解釈される。特徴(2)は、MSK 測線下で断層すべり量が大きく、 破壊が地表付近まで達していることと整合的である。MSK モデルでは低比抵抗領域は断層直下に位置しているのに対し、NSH モデルではより南側に位置していることは、InSAR 解析(Fujiwara et al., 2016)で見いだされた地表変位の分布(図 27)と共通している。

467



図 25 浅部比抵抗構造探査の測線。



図 26 浅部比抵抗構造モデル。 左側に MSK モデルを,右側に NSH モデルを示す. ▼は観測点の位置を、▼は断層地表トレースの位置を示す。



図 27 InSAR 解析 (Fujiwara et al., 2016)から求められた地表変位の分布と AMT 測線。 赤破線の領域は、布田川断層帯の南側に地表変位が多くあらわれている領域を示す。

8) 布田川・日奈久断層帯における深部比抵抗構造探査

従来のデータを用いて行った3次元解析では、宇土半島、日奈久断層帯周辺についてデ ータが不足しており、推定された比抵抗構造を日奈久断層帯および布田川断層帯宇土区間 の強震動評価に用いるのに不十分であった。そこで平成30年度に、宇土半島、日奈久断層 帯周辺、熊本平野において新たに41点で広帯域MT観測、電場観測を実施し、計130点の データを用いて深さ15kmまでの3次元比抵抗構造を推定した。得られたデータから水平電 場ー水平磁場の応答関数(インピーダンス)と、水平磁場一鉛直磁場間の地磁気変換関数を 算出した。電場のみの観測点では近傍のMT観測点の磁場データを用いてインピーダンスの み算出した。応答関数の推定にはAizawa et al., (2013)と同様のノイズ軽減手法を用い た。次に、既存データを加え130観測点で得られたインピーダンスと地磁気変換関数を入 力とした3次元解析を行い、比抵抗構造を推定した。430 km(南北方向)x430 km(東西 方向)x250 km(鉛直方向)の計算領域において、熊本地震震源域を中心とした66 km x66 kmの範囲はメッシュサイズを1.5 kmと細かく設定し、そこから外側にいくにつれてメッ シュサイズが大きくなるよう設定した。Siripunvaraporn et al. (2009)の差分法による比 抵抗インバージョンコードを用い、海底地形、陸上の地形(標高による起伏)を表現し、3 次元比抵抗構造の推定を行った。海水の比抵抗値は 0.33 Ωm, 空気の比抵抗値としては 108 Ωm を用いた。

得られた比抵抗構造の水平断面を図 28 に、熊本地震の本震の震源断層面(Asano and Iwata, 2016)に沿った断面図を図 29 に、サブテーマ3の想定地震断層面に沿った断面図 を図 30 に示す。熊本地震と比抵抗構造に以下の関係が存在する。

 ① 震源域の地下深部(深さ5~15 km)には低比抵抗領域が存在し、2016年4月14日の前 震、2016年4月16日の本震、さらに2000年6月に益城町付近で発生したM5.0の地震、 いずれの震源も深部低比抵抗領域の縁に位置している(図28、深さ13 km 断面)。

② 上記の熊本地震に関連した深部低比抵抗領域は、サブテーマ3において想定される震源 断層のごく近傍に位置している(図 28)。

③ 余震のうち規模の大きいもの(M4.7以上)は低比抵抗体の縁で発生した(図 29)。

④ 本震の大すべり域(Asano and Iwata, 2016)は、熊本市と阿蘇火山に存在する2つの深 部低比抵抗領域に挟まれた領域に位置している(図29)。

前震、本震を含め規模の大きい地震の震源が低比抵抗体の縁に位置していることは、破 壊開始に流体が強く関与していることを示唆している。また、流体が関与した地震は規模 が大きい破壊につながる可能性が高いことを示唆している。大すべり域と比抵抗構造の対 応からは、阿蘇火山地下深部に存在する低比抵抗体が破壊の進展を阻んだことを示唆して いる。以上の経験測、仮説をサブテーマ3の想定地震断層面に沿った比抵抗断面図(図 30) に適用すると、以下のことが示唆される。

⑤ 日奈久断層帯において、破壊が北部から開始するならば、高野白旗区間の南側付近から 破壊が開始する可能性が高い(高野白旗区間の中央部は顕著な低比抵抗領域なため)(図 30 下段)。

⑥ 日奈久断層帯が西傾斜で破壊するならば、高野一白旗から日奈久北部、日奈久南部の3 つの区間をまたいだ破壊が想定される(日奈久北部区間一日奈久南部区間の想定断層面上 に深部低比抵抗体は存在しないため)(図30下段)。日奈久断層帯が鉛直に破壊するなら ば、破壊が日奈久北部区間、日奈久南部区間のどちらかにとどまる可能性がある。(日奈久 北部区間、日奈久南部区間の接合部直下に低比抵抗体が存在するため(図28、7km以深))。
⑦ 布田川断層帯宇土区間において、破壊が東部から開始するならば宇土区間中央部で破壊

が開始する可能性が高い(低比抵抗体の縁が宇土区間中央部に対応するため)(図 30 上段)。

470



図 28 3次元解析により推定した比抵抗構造(水平断面) □は解析に使用した広帯域 MT 観測点を示す。海抜下 13km(13km b. s. 1.)の断面に示した 3 つの星印は、大きいものから、本震、前震、2000 年 6 月に発生した M5.0 の地震の震源を それぞれ示している。茶実線は活断層(活断層研究会編, 1991)を、白実線は阿蘇カルデラ を示す。サブテーマ3の想定断層面の最浅部を各水平断面に重ねて示している。



図 29 3次元解析により推定した比抵抗構造 (Asano and Iwata, 2016 による本震の推定 断層面に沿った比抵抗断面を示している)。星印は本震の震源、〇印は M4.7 以上の地震の 震源(期間: 2016 年 4 月 14 日~2017 年 12 月 31 日)のうち、断層面から±4 km 以内のもの を示している。実線は熊本地震本震の推定すべり分布を2, 3, 4, 5 m のコンターで表 している (Asano and Iwata, 2016)。



図 30 3次元解析により推定した比抵抗構造(サブテーマ3の想定断層に沿った断面)。破線は各区間の境界を示す。

9) 布田川・日奈久断層帯における震源断層モデルの推定

サブテーマ1、サブテーマ2-1、サブテーマ2-2の調査結果を参照して、サブテーマ 3で行う強震動シミュレーションに用いる布田川・日奈久断層帯の震源断層モデルを全サ ブテーマ共同で検討した。作成した震源断層モデルについては、サブテーマ3で詳しく報 告されるが、ここではサブテーマ2-1の解析結果を用いた震源断層パラメータ推定につい て報告する。

布田川・日奈久断層帯の震源断層のうち、熊本地震の震源断層となった布田川断層帯布 田川区間と日奈久断層帯高野-白旗区間については、稠密臨時地震観測網による高精度震源 分布(図4)や強震動解析、GNSSや InSARによる地殻変動などから断層パラメータが得ら れている。熊本地震で破壊しなかった区間の震源断層を推定するため、本研究で得られた 3次元地震波速度構造を用いて布田川・日奈久断層帯の全区間の震源再決定を行った。そ の結果を図31~図33に示す。そのうち、図31と図32は布田川断層帯の震源分布であり、 図31が熊本地震の本震以西、図32が熊本地震の本震以東の震源を布田川断層帯に直交す る断面に投影したものである。断面図の南東寄りの領域には、北西方向に傾斜する日奈久 断層帯の震源が認められるが、布田川断層帯の震源は震源断層との関係は明瞭ではない。 布田川断層帯宇土区間の震源(図31のB5~B7)は、熊本平野の中心部で盆状に深くなる 傾向がある。なお、断面図の西端付近には北西に傾斜する震源分布が認められるが、これ らは布田川断層帯のトレースから北側に15km以上離れており、布田川断層帯には対応しな い。一方、図32には、あまり明瞭ではないが布田川断層帯布田川区間に対応する北西傾斜 の震源分布が認められる(図32のB9~B10)。



図 31 布田川・日奈久断層帯および周辺で発生する地震の震源分布。震源再決定した地震の期間は、1993 年 1 月~2018 年 6 月。右図は、熊本地震の本震以西の震源を布田川断層帯 に直交する断面(B1~B8)に投影したものである。



図 32 布田川・日奈久断層帯および周辺で発生する地震の震源分布。震源再決定した地震の期間は、1993 年1月~2018 年6月。右図は、熊本地震の本震以東の震源を布田川断層帯 に直交する断面(B9~B14)に投影したものである。



図 33 布田川・日奈久断層帯および周辺で発生する地震の震源分布。震源再決定した地震の期間は、1993 年 1 月~2018 年 6 月。下段は、震源を日奈久断層帯に直交する断面(A1~A24)に投影したものである。

図 33 において、A5~A8 が日奈久断層帯高野-白旗区間、A9~A16 が日奈久断層帯日奈久区 間、A17~A24 が日奈久断層帯八代海区間にそれぞれ対応しており、高野-白旗区間と日奈 久区間については北西傾斜の震源分布が明瞭に認められる。これらの震源分布の特徴から、 高野-白旗区間と日奈久区間の傾斜角について、それぞれ 62 度および 60~50 度が推定され た。さらに、日奈久区間については、断層の走向の屈曲や地質構造から、北部と南部に分 かれることがサブテーマ1から指摘されており、図 33 の震源分布からは北部の傾斜角は 60 度、南部は 50 度と推定された。しかし、日奈久区間南部で発生する地震の発震機構は ほぼ鉛直な節面をもつ横ずれ型が多いこと、また、当該地域の断面図(A12)には活断層ト
レース直下に鉛直な震源分布も認められる(図 34)ことから、日奈久区間南部については、 北西傾斜 50 度の断層面と鉛直な断層面の2ケースを想定することとした。



日奈久断層帯日奈久区間南部の地震活動

図 34 日奈久断層帯日奈久区間南部の震源断面図と推定される断層面。右図は、左図の A12 における震源断面図。赤線は想定震源断層の断層面。

なお、布田川断層帯宇土区間、宇土半島北岸区間、日奈久断層帯八代海区間については、 震源分布から震源断層の位置や形状を推定することはできなかったが、宇土区間の位置に ついては、熊本平野における反射法地震探査の結果(図 23)などにより、地震本部による 評価位置よりも約1km北側に設定した。また、震源断層の幅(下端)については、当該地 域の背景の地震活動の D95 から推定した。

震源断層のすべり方向(スリップベクトルの向き)については、想定した震源断層面に 働く起震応力分布から推定した。布田川・日奈久断層帯周辺では、熊本地震の発生以前か ら活発な微小~小地震活動があったため、起震応力分布はこれら背景の地震活動と熊本地 震の前震・余震活動の応力テンソルインバージョンから求めた(図 35)。図 35 では、背景 地震活動または熊本地震の前震・余震活動が見られた領域の応力場を、下半球等積投影の 震源球で示している。これらの応力場から想定震源断層面での最大せん断応力の方向を計 算し、その方向に想定断層がすべると考えて、すべり方向を推定した。このようにして推 定されたすべり方向は、同一の断層区間内においても場所によってすべり方向に違いが見 られることがわかった(図 36)。また、日奈久断層帯日奈久区間南部については、傾斜角 50 度のケース(図 36 の Hinagu-Nanbu 1)と鉛直のケース(図 36 の Hinagu-Nanbu 2)に ついて、すべり方向を推定したが、傾斜角の違いによって、すべり方向は大きく異なるこ とが明らかになった。なお、日奈久断層帯八代海区間については、応力テンソルインバー ジョンを行う充分なデータがなく、地震活動からすべり方向を推定することができなかっ たため、サブテーマ2-2による地殻ひずみ場などを参照してすべり方向を推定した。

応力場 Depth : 10 km (7.5 – 12.5 km)



図 35 応力テンソルインバージョンによって推定された布田川・日奈久断層帯周辺の起震 応力分布。解析地域を多数の小領域に分割し、各領域の起震応力を、下半球等積投影の震 源球で示した。図中には熊本地震の震源断層も矩形で示されている。左図は熊本地震の最 大前震発生以前、中央図は熊本地震の最大前震から本震まで、右図は熊本地震の本震以後 に発生した深さ 7.5km~12.5km の地震活動から推定した応力場である。



図 36 布田川・日奈久断層帯の各区間の震源断層面におけるすべり方向分布。図 35 に示 す応力場から計算される最適すべり方向をバーで示す。バーが表示されていない部分は、 起震応力が得られていないため、すべり方向の推定ができない領域である。

震源断層のアスペリティは、サブテーマ3により、各区間の震源断層の中央部に設定したが、この設定の妥当性をチェックするため、Shito et al. (2017)の解析範囲を布田川・ 日奈久断層帯に沿って南西側に拡大して地震トモグラフィー解析を行い、その結果得られた3次元地震波速度構造モデルと想定震源断層を比較した。図37は各区間の震源断層面に対応するP波速度分布、図38は各区間の震源断層面に対応するS波速度分布をそれぞれ示したものである。



図 37 布田川・日奈久断層帯の各区間の震源断層における P 波速度分布。 a:日奈久断層帯高野-白旗区間、b:日奈久断層帯日奈久区間北部、c:日奈久断層帯日奈 久区間南部、e:日奈久断層帯八代海区間北部、f:日奈久断層帯八代海区間南部。

中央の図は、各区間の震源断層を地表に投影したもので、赤線が断層の地表トレースである。左右の図は、震源断層の投影図に P 波速度分布を重ねて表示したものである。各区間 の震源断層内の矩形はアスペリティの位置を示す。



図 38 布田川・日奈久断層帯の各区間の震源断層におけるS波速度分布。 左右の図は、震源断層の投影図にS波速度分布を重ねて表示したものである。その他の説 明については、図 37 を参照のこと。

図 37 と図 38 を見ると、震源断層浅部の地震波速度は小さく、深部になるにつれて速度 が大きくなる傾向があるが、断層深部においても部分的に低速度の領域が認められる。サ ブテーマ3で設定したアスペリティは、低速度域(図中の赤色の領域)にはなく、中庸な 速度域(図中の黄色の領域)に位置していることが分かる。図7に示したように、熊本地 震の震源断層の大すべり域(アスペリティに相当)は、低速度域を避けて中庸な速度域に 対応していることが明らかになっており、このことから本研究でサブテーマ3が設定した アスペリティの位置は、地震波速度構造からは妥当であると考えられる。一方、図 29 に示 したように、熊本地震の震源断層の大すべり域は、高比抵抗領域に対応していることから、 本研究で設定したアスペリティが高比抵抗領域であるかどうかも調べた。その結果、日奈 久断層帯高野--白旗区間や同断層帯日奈久区間、布田川断層帯宇土区間については、アスペ リティを置いた断層中央部は概ね高比抵抗であることが確認された(図30)。しかし、布 田川断層帯宇土半島北岸区間については断層中央部はやや低比抵抗になっており、設定し たアスペリティと高比抵抗領域が対応しないことが示された(図 30)。震源断層と地震波 速度構造・比抵抗構造との関係は、震源断層の位置・形状に依存する。宇土半島北岸区間 については、断層の位置・形状に関する情報がほとんど得られていないため、今後の詳細 な調査が必要である。

震源断層における破壊の開始点については、比抵抗構造が参照された。熊本地震の本震の破壊開始点(図 29 の星印)が低比抵抗領域の縁に位置していることから、日奈久断層帯の北側から破壊する場合の破壊開始点は、高野-白旗区間の低比抵抗領域の縁(図 30 下段の水平距離-4km、深さ-13kmの位置;図 37 と図 38 の領域 a のアスペリティの南西端)に設定された。また、布田川断層帯の宇土区間と宇土半島北岸区間が東側から破壊する場合の破壊開始点は、宇土区間の低比抵抗領域の縁(図 30 上段の水平距離 0 km、深さ-15kmの位置;図 37 と図 38 の領域 g のアスペリティの中央下部)に設定された。

(c) 結論ならびに今後の課題

本研究では、まず熊本地震の活動に関して、従来の研究成果を整理し、熊本地震後の臨 時観測データを解析して、その地震学的背景についてまとめた。その結果、熊本地震の複 雑な活動は起震応力場が一軸引張に近いことによること、過去の地震活動による非弾性ひ ずみの大きな領域の端付近で発生したことを示した。また、地震発生ポテンシャルに関し ては、熊本地震にともなって広域に発生した余震・誘発地震活動と比抵抗構造との対応を 検討した。その結果、地震活動は、主に低比抵抗体の周辺で発生していることが明らかに なった。

熊本地震の震源断層に関しては、前震発生から本震を含む約1週間の間に発生した地震 について、布田川・日奈久断層帯およびその周辺の3次元速度構造を用いて高精度震源決 定を行い、断層構造の推定を行った。その結果、震源分布から日奈久断層帯側は北西側に 傾斜した面が明瞭にみられたが、布田川断層帯側では地震活動が低く、震源分布から明瞭 な面を認識することはできなかった。また、前震や本震の震源(初期破壊点)が位置する 布田川・日奈久断層帯のジャンクション領域では、震源分布は複雑で複数の面が混在して おり、震源断層は非常に複雑な構造をしていることが明らかとなった。最大前震や本震は 布田川・日奈久断層帯の傾斜方向とは逆の東南東傾斜の断層面で破壊が発生し、それが日 奈久断層帯高野-白旗区間や布田川断層帯布田川区間の主断層面に乗り移って大きなすべ りが発生したと推定される。

布田川・日奈久断層帯周辺の3次元地震波速度構造と背景の地震活動および熊本地震の 震源分布、さらには熊本地震の大すべり域との比較から、地震は低速度域を避けて発生し ていることや、大すべり域は極端な低速度や高速度ではない中庸な速度領域に対応するこ とが明らかになった。また、熊本地震発生前の背景の地震活動の深さの下限(D95)から本 震の震源断層の幅が推定可能であることが確認された。

さらに、起震応力の解析から、熊本地震の発生により断層帯近傍のせん断応力が減少し たことや、熊本地震発生前の背景の地震活動から推定した応力場で本震時のすべり方向を 予測できる可能性が示された。GNSS の繰り返し観測による日奈久断層帯高野-白旗区間と 日奈久区間の境界部の地殻変動の特徴からは、震源断層南西端の位置や形状について詳細 な情報が得られたほか、熊本地震時および熊本地震後の断層すべりは高野-白旗区間に留ま っており、GNSS で検知できるほどの断層すべりは日奈久区間に及んでいないと推定された。 今後も引き続き GNSS の繰り返し観測を実施して、断層すべりが日奈久区間に伸展するか否 かをモニターすることが、日奈久断層帯における地震発生過程を理解し、将来の地震発生 予測を行うために重要であると考えられる。 これらの調査に加え、地震調査研究推進本部(2013)により熊本平野南部に伏在してい ると推定されている布田川断層帯字土区間(字土断層)の断層位置・形状と熊本平野の深 さ1000m程度までの地下構造を明らかにすることを目的として、反射法地震探査を実施し た。その結果、熊本平野においては、白亜系の基盤が海抜下約500mまで盆状に凹んでそ の上に阿蘇山の火砕流などの第四系が堆積している詳細な構造が明らかになった。また、 基盤より上部の堆積層には、宇土断層の伏在が推定されている付近に複数の正断層が認め られ、それぞれの断層の鉛直変位は、阿蘇火砕流堆積物で数10m程度と推定された。この ことは、宇土断層に対応する活断層群の存在を示唆する。しかし、これらの断層変位に対 応する基盤岩上面の変形は明瞭ではなく、さらに調査が必要である。

本震で破壊した布田川断層帯については、断層浅部を対象とした AMT 法による探査を行 い、地表付近にまで大すべりが達した地域と、そうでない地域の比抵抗構造の差異を調査 した。その結果、大すべり領域に位置する熊本県上益城郡益城町では、小すべり領域であ る熊本県阿蘇郡西原村よりも全般に低比抵抗であり、顕著な低比抵抗領域が浅い部分まで 分布していることが明らかになった。これらの低比抵抗領域は、布田川断層帯に沿う破砕 域への地下水の浸入や断層粘土によると考えられるため、断層すべり量が大きい益城町で は破壊が地表付近まで達していることを示唆する。また、西原村では断層地表トレースに よりも南側に低比抵抗領域が位置しており、これは InSAR 解析で見いだされた地表変位の 分布に対応していることがわかった。

布田川・日奈久断層帯の深部比抵抗構造については、当該地域で過去に実施された MT 観測データに加え、宇土半島、日奈久断層帯周辺、熊本平野において新たに 41 点で広帯域 MT 観測および電場観測を実施し、計 130 点のデータを用いて深さ 15km までの 3 次元比抵 抗構造を推定した。その結果、熊本地震の本震の震源域の地下深部(深さ5~15km)には低 比抵抗領域が存在し、本震の破壊開始点は低比抵抗領域の縁に位置すること、最大前震や 規模の大きな余震の震源も深部低比抵抗領域の縁に位置していることが示された。また、 本震の大すべり域は、相対的に高比抵抗の領域に対応していることが明らかになった。こ れらのことは、破壊開始に流体が強く関与していることを示唆している。また、比抵抗構 造から震源断層の破壊開始点や大すべり域をある程度推定できる可能性を示している。

以上の調査研究成果を用いて、布田川・日奈久断層帯の震源断層の断層パラメータを推 定した。具体的には、熊本平野における反射法地震探査の結果から布田川断層帯宇土区間 の断層位置を推定したほか、高精度震源分布から震源断層の幅(震源断層下端の深さ)と 断層面の傾斜角、起震応力分布から震源断層のすべり角を、また、比抵抗構造から破壊開 始点をそれぞれ推定した。

本調査研究により、上述のように熊本地震を引き起こした応力場や震源断層の特徴を明 らかにしたほか、布田川・日奈久断層帯において将来発生が想定される地震の震源断層の 推定に寄与することができた。しかしながら、本調査研究では、布田川断層帯宇土半島北 岸区間や日奈久断層帯八代海区間については、対象領域が主に海域ということもあって観 測網や観測データが不足しており、地震波速度構造や比抵抗構造の分解能も充分ではない。 今後はこれらの地域における高精度観測が課題である。また、平成31年3月時点において も、熊本地震の地震活動や地殻変動は衰えながらも続いていることから、今後も観測を継 続して活動の推移を明らかにするとともに、データを蓄積して解析の高精度化をはかる必 要がある。

本調査における観測や探査については、熊本県、熊本市、宇土市をはじめ、関係の皆様 のご理解とご協力により行うことができた。記して感謝申し上げる。

(d) 引用文献

- Aizawa K, Koyama T, Uyeshima M, Hase H, Hashimoto T, Kanda W, Yoshimura R, Utsugi M, Ogawa Y, Yamazaki K, Magnetotelluric and temperature monitoring after the 2011 sub-Plinian eruptions of Shinmoe-dake volcano, Earth Planets Space 65, 539-550, doi:10.5047/eps.2013.05.008, 2013.
- Aizawa K, et al. 著者 32 名, Seismicity controlled by resistivity structure: the 2016 Kumamoto earthquakes, Kyushu Island, Japan, Earth Planets Space 69, doi:10.1186/s40623-016-0590-2, 2017.
- Asano, K. and T. Iwata, Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, Earth, Planets and Space, 68,147, doi:10.1186/s40623-016-0519-9, 2016.
- Fujiwara, S., Yarai, H., Kobayashi, T., Morishita, Y., Nakano T., Miyahara B., Nakai H., Miura Y., Ueshiba H., Kakiage Y., and Une, H., Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry, Earth, Planets and Space, 68, 160, doi.org/10.1186/s40623-016-0534-x, 2016.

長谷義隆・岩内明子,中部九州の湖成層を含む上部新生界の対比(熊本・大分地域). 熊本 大学教養部紀要,自然科学編, vol.27, p. 69-95, 1992.

Ichihara H, Sakanaka S, Mishina M, Uyeshima M, Nishitani T, Ogawa Y, Yamaya Y, Mogi T, Amita K, Miura T, A 3-D electrical resistivity model beneath the focal zone of the 2008 Iwate-Miyagi Nairiku earthquake (M 7.2), Earth Planets Space 66, doi:10.1186/1880-5981-66-50, 2014.

石坂信也・岩崎泰頴・長谷義隆・渡辺一徳・岩内明子・田尻雅則, 熊本平野地下に分布す る最終間氷期の堆積物と平野の沈降速度. 第四紀研究, vol. 34, no. 5, p. 335-344, 1995. 地震調査研究推進本部, 布田川断層帯・日奈久断層帯の評価(一部改訂). 66p, 2013. 活断層研究会編, 新編日本の活断層, 東京大学出版会, 448p, 1991.

- Kobayashi, H., K. Koketsu, and H. Miyake, Rupture processes of the 2016 Kumamoto earthquake sequence: Causes for extreme ground motions, Geophysical Research Letters, 44, 6002-6010, 2017.
- 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, doi:10.1186/s40623-016-0536-8, 2016.

熊本県環境公害部,地盤平野地盤沈下調査報告書.熊本県環境保全課, 62p, 1995.

熊本県地質図編纂委員会編著,電子版熊本県地質図(10万分の1)」.社団法人熊本県地質調 査業協会発行,2008.

- Matsumoto, S., S. Nakao, T. Ohkura, M. Miyazaki, H. Shimizu, Y. Abe, H. Inoue, M. Nakamoto, S. Yoshikawa and Y. Yamashita, Spatial heterogeneities in tectonic stress in Kyushu, Japan and their relation to a major shear zone, Earth, Planets and Space, 67, 172, doi:10.1186/s40623-015-0342-8, 2015.
- Matsumoto, S., T. Nishimura, T. Ohkura, Inelastic strain rate in the seismogenic layer of Kyushu Island, Japan, Earth, Planets and Space, 68, 207, doi: 10.1186/s40623-016-0584-0, 2016.
- Matsumoto, S., Yamashita, Y., Nakamoto, M., Miyazaki, M., Sakai, S., Iio, Y., Shimizu, H., Goto, K., Okada, T., Ohzono, M., Terakawa, T., Kosuga, M., Yoshimi, M. and Asano, Y., Prestate of Stress and Fault Behavior During the 2016 Kumamoto Earthquake (M7.3), Geophysical Research Letters, 45(2), 637-645, 2018.
- 松本聡, 光岡郁穂, 飯尾能久, 酒井慎一, 2016 年熊本地震 合同地震観測グループ, 2016 年熊本地震震源域における応力場のモデル化(3), 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, SSS15-12, 2018.
- 松島健, 手操佳子, 中尾茂, 清水洋, 松本聡, 中元真美, 内田和也, GNSS Campaign 観測 で捉えられた 2016 年熊本地震の地殻変動, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, MIS34-P32, 2016.
- Mitsuoka, A., S. Matsumoto, Y. Yamashita, M. Nakamoto, M. Miyazaki, S. Sakai, Y. Iio, and Group for urgent joint seismic observation of the 2016 Kumamoto earthquake, Change in state of stress around Hinagu fault zone through the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, SCG57-26, 2018.
- Ogawa, Y. and T. Uchida, A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, Geophysical Journal International, 126, 69-76, 1996.
- Saiga, A., S. Matsumoto, K. Uehira, T. Matsushima, and H. Shimizu, Velocity structure in the crust beneath the Kyushu area, Earth Planets Space, 62, 449-462, 2010.
- 猿山光男,日本の地下水「熊本平野」.地球社発行, p.749-757, 1986.
- Shito, A., S. Matsumoto, H. Shimizu, T. Ohkura, H. Takahashi, S. Sakai, T. Okada, H. Miyamachi, M. Kosuga, Y. Maeda, M. Yoshimi, Y. Asano, and M. Okubo, Seismic velocity structure in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Japan, Geophysical Research Letters, 44(15), 7766-7772, 2017.
- Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation. Phys. Earth. Planet. Int., 173(3-4), 317-329, 2009.
- 矢来博司,小林和勝,森下遊,藤原智,檜山洋平,河本智司,上芝晴香,三浦優司,宮原 伐折羅, 熊本地震に伴う地殻変動から推定された震源断層モデル, 国土地理院時報, 128, 169-176, 2016.
- Yoshimura R, et al., Magnetotelluric observations around the focal region of the 2007 Noto Hanto Earthquake (M-j 6.9), Central Japan, Earth Planets Space 60(2),

117-122, 2008.

Zhang, H. and C. H. Thurber, Double-Difference Tomography: The method and its application to the Hayward fault, California, Bull. Seismol. Soc. Am., 93(5), 2875-1889, 2003.

3.2 断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造の解明のための調査観測

3.2-2 地殼変動調査観測

(1)業務の内容

(a) 業務題目 断層帯の三次元的形状・断層帯周辺の地殻構造の解明のための調査観測

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	
国立大学法人鹿児島大学理工学研究科	教授	中尾 茂	
国立大学法人鹿児島大学地震火山地域防災センター	准教授	八木原 寛	
国立大学法人鹿児島大学理工学研究科	技術補佐員	榊原 直美	
国立大学法人名古屋大学環境学研究科 附属·地震火	准教授	伊藤 武男	
山研究センター			
国立大学法人名古屋大学 全学技術センター	技術職員	松廣 健二郎	
国立大学法人京都大学防災研究所 地震予知研究セ	准教授	西村 卓也	
ンター			
国立大学法人京都大学防災研究所 地震予知研究セ	助教	山崎健一	
ンター			
国立大学法人京都大学防災研究所 地震予知研究セ	技術職員	小松 信太郎	
ンター			
国立大学法人高知大学 自然科学系理学部門	教授	田部井 隆雄	
国立大学法人高知大学 自然科学系理学部門	准教授	大久保 慎人	
国立大学法人高知大学 理学部付属高知地震観測所	技術職員	山品 匡史	

(c) 業務の目的

布田川断層帯および日奈久断層帯周辺のひずみ場を推定する。さらに観測された地震時 変動から震源断層の形状を、長期に継続して観測されている余効変動から余効変動発生源 をそれぞれ推定する。これらの調査結果を踏まえて震源断層の形状を推定する。

(d) 3 ヵ年の年次実施業務の要約

1) 平成 28 年度:

日奈久断層帯南部(八代区間)の地殻変動を把握するため、鹿児島県出水郡長島町 獅子島に GNSS 連続観測点を設置し、観測を開始した。平成 28 年熊本地震の震源断 層の形状を GNSS 連続観測より求められた地震時変動から求めた。さらに、余効変動 の情報の収集を行った。

2) 平成 29 年度:

GNSS による余効変動観測を継続し、長期の余効変動の時間的空間的な特徴をあき らかにした。日奈久断層帯南部(八代区間)周辺の地殻変動を明らかにするため設 置した GNSS 観測点での連続観測を継続するとともに、布田川断層帯・日奈久断層帯 全域のひずみ場の推定を行った。

3) 平成 30 年度:

GNSS による余効変動観測を継続し、日奈久断層帯南部周辺の地殻変動を明らかに するための GNSS 連続観測による調査を継続した。余効変動をアフタースリップおよ び粘弾性による変形と考え、各観測点で観測された時系列変化において2つの変化を 分離し、アフタースリップについては断層上での変位を、粘弾性による変形について は粘性係数を求めることにより、余効変動のモデル化を行い、GNSS 変位より求めた 地震時変動、余震分布から求めた断層形状との比較を行った。日奈久断層帯八代区間 における平成28年熊本地震後の地殻変動を観測するために鹿児島県長島町獅子島に おいて約2年間の GNSS 観測を行った。しかし、ひずみにして10⁻⁸を超えるような顕 著な地殻変動は観測されなかった。

(2) 平成 28~30 年度の成果

(a) 業務の要約

国立大学法人の GNSS 観測グループが平成 28 年熊本地震直後に設置した GNSS 観測点 における観測を継続した。国土地理院の GEONET のデータを加えて GNSS 解析を行った結 果、平成 28 年熊本地震発生後約3年を経過した現在も余効変動が継続していることが 分かった。余効変動の原因としてアフタースリップと粘性緩和を考え、それぞれの緩和 時間とアフタースリップの継続時間及び断層上での滑りを求めた。また、日奈久断層帯 八代海区間付近の地殻変動を明らかにするために鹿児島県獅子島に設置した GNSS 観測 点での観測についても継続した。

2004 年1月から 2015 年 12 月までの国土地理院 GEONET、九州大学・京都大学・鹿児 島大学で設置共同観測を行っている観測点の変位速度を使用し、布田川断層帯・日奈久 断層帯およびその周辺のひずみ速度の詳細を明らかにした。平成 28 年熊本地震が発生 する以前は最大せん断ひずみ速度の方向が活断層の走向に一致していることがわかっ た。

(b) 業務の成果

平成28年4月16日に発生した平成28年熊本地震(マグニチュード(M)7.3)の地 震時変動を国土地理院が設置した布田川断層帯・日奈久断層帯周辺のGEONET 観測点、 九州大学・京都大学・鹿児島大学が設置したGNSS観測点、平成28年4月15日に北海 道大学・鹿児島大学が宇城市豊野小中学校に設置したGNSS観測点(以下、豊野観測点

(TYNO)と表記する)および気象庁が火山地域に設置している GNSS 観測点のうち阿蘇 山、九重山、鶴見岳観測点の合計 63 観測点について GNSS 解析プログラム RTKLIB(Takasu and Yasuda, 2010)を用いて kinematic 解析を行った。図1に観測点配置図を示す。本 事業で使用した観測点の属性を別表に示す。RTKLIB は相対測位でkinematic 解析を行う。 解析時の基準点は地震時変動が観測されないと考えられる長崎県五島列島の GEONET 観 測点である上対馬(950456)とした。図2に地震時変動の解析結果を示す。地震時変動 は地震時の前後5分間(データ10個)の平均の差として算出した。豊野観測点(TYNO) の地震時変動は、東西方向では変位の標準偏差とほぼ同程度で、上下方向では変位の標 準偏差を上回る変位は観測されなかったが、南北成分では南へ 21.8cm と大きな変位が 観測された。また、GEONET 長陽観測点(960701)では、3成分とも変位の標準偏差を超 えた変化が観測され、南北、東西、上下成分でそれぞれ南へ 70.5cm、西へ 66.6cm、上 方へ 24.7cm であった。



図1 地震時断層モデルを推定する際に使用した GNSS 連続観測点配置図。黒四角 は国土地理院の GEONET、青三角は九州大学・京都大学・鹿児島大学が設置した GNSS 連続観測点、灰四角は気象庁の火山監視用 GNSS 連続観測点、青丸は平成 28 年 4 月 15 日に北海道大学・鹿児島大学が設置した GNSS 連続観測点、黒色星印は気象 庁一元化震源による平成 28 年 4 月 16 日に発生した M7.3 の地震の震央を示す。



図2 平成28年4月16日の平成28年熊本地震時のキネマティック解析結果。左:宇 城市豊野小中学校(TYNO)。右:GEONET長陽観測点(960701)。横軸は平成28年4月15 日0時0分からの時刻を示し、縦軸は変位を示す。単位はcmである。赤は南北、緑は東 西、黄は上下の各成分を示す。

図3に各観測点の水平変位と上下変位のベクトルを示す。最大の水平変位は GEONET 長陽観測点(960701)で97.0cm、他に大きい変位は GEONET 熊本観測点(950465)の74.7cm であった。平成28年4月15日に設置した豊野観測点(TYN0)では21.8cm であった。



図3 地震時変動のベクトル図。左:水平成分。右:上下成分。赤いベクトル は観測値を、青いベクトルは推定した断層モデルから計算した理論値を示す。 オレンジ線は活断層(活断層研究会,1991)を示す。四角は推定された震源断 層を地表に投影したものを示し、太線が断層の浅部を示す。星印は気象庁一元 化震源による平成28年4月16日に発生したM7.3の地震の震央を示す。

布田川断層帯・日奈久断層帯に1枚ずつ矩形断層を仮定し、観測された地震時変動を 説明できる断層形状および断層変位を Simulated Annealing 法(Kirkpatrick et al., 1983)を使って求めた。推定された断層形状パラメータを表1に示す。推定された震源 断層は布田川断層帯・日奈久断層帯とも右横ずれ成分が大きいが、いずれも正断層成分 を含んでいる。また、すべり量は布田川断層帯の震源断層で約 4.5m と日奈久断層帯の 震源断層の約 0.8m に比べて大きく、地震時変動の源としては布田川断層帯の震源断層 が大きく寄与していることがわかった。

	経度	緯度	深さ	すべ	すべり角	長さ	幅 (km)	走向	傾き
	(度)	(度)	(km)	り量	(度)	(km)		(度)	(度)
	*	*		(m)	* *				* * *
布	130.9407	32.8495	0.2	4.452	-164	16.0	13.7	230	68
田									
川									
断									
層									
帯									
日	130.7843	32.7164	1.0	0.797	-163	23.5	19.6	208	85
奈									
久									
断									
層									
帯									

表1 推定された断層パラメータ

*:緯度経度は、断層上端の中央の位置の緯度経度を示す。

**: すべり角は、下盤に対する上盤のすべり方向を、断層面上で走向から反時計 回りに測った角度を示す。

***:断層面の傾きは、走向に対し右側に傾き下がる角度(伏角)を示す。

平成 28 年 4 月 14 日 M6.5 の地震発生直後から国立大学法人の GNSS グループは共同で 布田川断層帯・日奈久断層帯周辺のほか、地震活動が活発化した阿蘇山東側や大分県に 余効変動あるいは地震活動に関連した地殻変動を観測するため、平成 28 年 4 月 28 日ま でに合計 21 の GNSS 観測点を設置し、連続観測を開始した(図 4)。参加した国立大学 法人は、北海道大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大 学、鹿児島大学である。図 4 には国土地理院 GEONET 観測点、気象庁火山監視用 GNSS 観 測点、九州大学・京都大学・鹿児島大学が設置した GNSS 観測点、本事業で設置した GNSS 連続観測点の位置も併せて示した。平成 28 年熊本地震発生後に国立大学法人の GNSS グ ループが設置し、本事業で観測を継続した GNSS 連続観測点のうち、UBUS および NGMK は、 観測点の建物の取り壊しのため、平成 29 年 8 月 31 日および平成 30 年 9 月 11 日に撤収 した。



図4 九州中央部の GNSS 連続観測点配置図。黒四角は国土地理院の GEONET、青三角 は九州大学・京都大学・鹿児島大学が設置した GNSS 連続観測点、灰四角は気象庁の 火山監視用 GNSS 連続観測点、青丸は平成 28 年熊本地震発生後に国立大学法人の GNSS 観測グループによって共同設置された GNSS 連続観測点、赤四角は本事業で獅子島に 設置した GNSS 連続観測点を示す。黄色星印は平成 28 年 4 月 16 日に発生した M7.3 の地震の気象庁が決定した震央を示す。赤丸は気象庁一元化震源である。平成 28 年 熊本地震発生後に設置した観測点のうち、緑丸と赤丸で囲んだ観測点は、それぞれ 平成 29 年 8 月 31 日と平成 30 年 9 月 11 日に撤収した。

日奈久断層帯南部(八代海区間)の地殻変動を把握するため、鹿児島県出水郡長島町 獅子島にある獅子島小中学校の屋上に GNSS 連続観測点(以下、獅子島観測点(SSJM) と表記する)を設置し、平成29年3月10日に観測を開始した。獅子島東方沖には日奈 久断層帯日奈久区間の南西延長に連続する獅子島東方沖断層群(楮原・他,2011)があ るため、日奈久断層帯の高野一白旗区間、日奈久区間との地殻変動を比較するため獅子 島に GNSS 連続観測点を設置した。GNSS 受信機は Trimble5700 を、GNSS アンテナはレド ーム付きチョークリングアンテナを使用した。電源はバッテリーと太陽電池パネルをそ れぞれ2個使用した。データは小型の Linux コンピュータに収録している。図5に GNSS 観測点の写真を示す。



図5 本事業で獅子島に新設した GNSS 観測点(獅子島観測点(SSJM)の写真。右 上は GNSS アンテナの設置状況、左下は全体の設置状況を示す。

九州大学、京都大学、鹿児島大学で設置した GNSS 連続観測点と国土地理院の GEONET 観測点のデータを用いて各観測点の変位速度を求め、佐藤・他(2002)の方法でひずみ 速度を求めた。

ひずみ速度の解析に用いた観測点を図6に示す。九州大学、京都大学、鹿児島大学で 設置した観測点は2009年から2010年3月までに順次設置された。

2004 年1月1日から 2015 年12 月 31 日までの各観測点の座標データを使用して変位 速度を最小二乗法で求めた。各観測点の水平成分の変動 y(t) を式(1)で表されるとし、 最小二乗法で各振幅を求めた。

$$y(t) = at + b + c \sin\left(\frac{2\pi t}{365.25}\right) + d \cos\left(\frac{2\pi t}{365.25}\right) + e \sin\left(\frac{4\pi t}{365.25}\right) + f \cos\left(\frac{4\pi t}{365.25}\right) + \sum g_i H(t - t_i)$$
(1)

ここで、第一項は変位速度、第二項は定数項、第3項と第4項は年周成分、第5項と 第6項は半年周成分、第7項は GEONET のアンテナ交換によるステップや地震時の変動 を表している。Hはヘビサイド関数を示す。2011年3月11日に発生した平成23年東北 地方太平洋沖地震の地震時変動は九州各地でも観測されているため、この変動について は、使用した全観測点において式(1)の第7項で推定した。GEONET 観測点の940087、 950450、960685、021062、021063の5点では、2005年3月20日に発生した福岡県西方 沖の地震の地震時変動も第7項で同時に推定した。また、豊後水道ではこれまでたびた びスロースリップが発生していることが知られており、解析期間においても2010年に スロースリップが発生している(Ozawa et al., 2013)。スロースリップは定常変動と は異なる変動であるため、スロースリップを含んだ時系列で変位速度を求めると本来の 定常変動とは異なる変動を求めることになると考えられる。そこで時系列変化や Ozawa et al. (2013)の解析結果を参考に図7の黒線で囲った観測点において 2010 年 2月1日 から 2010 年 10 月 31 日までをスロースリップの発生期間とし、その期間のデータを欠 測として扱い、スロースリップによる変動量は 2010 年 11 月1日にステップが発生した と仮定し、式(1)の第7項により推定した。



図6 ひずみ速度の解析に用いた GNSS 観測点配置図。青三角は九州大学、京都大学、 鹿児島大学で設置した観測点、赤四角は国土地理院の GEONET 観測点を示す。黒線と海 岸線で囲まれ、東経 131 度より東、北緯 32.87 度より北の領域にある観測点は豊後水道 スロースリップの影響を取り除く処理をした観測点である。オレンジの線は活断層(活 断層研究会,1991)を示す。

各観測点における変位速度を General Mapping Tool (Wessel et al., 2013)のコマ ンドである surface を使って5分間隔のグリッドでの変位速度を東西成分、南北成分そ れぞれについて求める。図6に求めた変位速度のコンター図を示す。ベクトルは GEONET 上対馬観測点(950456)を固定点として表した各観測点の変位速度である。



図7 各観測点の変位速度から内挿された変位速度分布。左:南北成分、右:東 西成分。観測点の変位速度は GEONET 上対馬観測点 (950456)を固定点としている。

グリッドごとに求めた変位速度を使ってひずみ速度を求める。i番目のグリッドの座標 $b(x_i, y_i)$ とし、そこでの変位速度を (\dot{u}_i, \dot{v}_i) とするとひずみ速度は式(2)を使って求められる。

$$\varepsilon_{xi} = \frac{\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}}{x_i - x_{i-1}},$$

$$\varepsilon_{yi} = \frac{\dot{v}_i - \dot{v}_{i-1}}{y_i - y_{i-1}},$$
(2)
$$\varepsilon_{xyi} = \frac{1}{2} \left(\frac{\dot{u}_i - \dot{u}_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} + \frac{\dot{v}_i - \dot{v}_{i-1}}{y_i - y_{i-1}} \right)$$

図8にひずみ速度の東西成分と南北成分を示す。東西成分では縮みが卓越し、特に大 分県の国東半島から別府湾にかけてと阿蘇山周辺で大きく縮んでいる。一方南北成分で は伸びが卓越しており、特に姶良カルデラで大きく伸びている。



図8 ひずみ速度の東西成分(左)と南北成分(右)。

面積ひずみ速度 Θ 、最大せん断ひずみ速度 Σ と主ひずみ速度 ϵ_1 、 ϵ_2 とその方向は宇津 (2001)を参考に以下のように計算した。

$$\Theta_i = \varepsilon_{xi} + \varepsilon_{yi} \tag{3}$$

$$\Sigma_i = \left(\varepsilon_{xi} - \varepsilon_{yi}\right)^2 + 4\varepsilon_{xyi}^2 \tag{4}$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2} (\Theta_i + \Sigma_i) \tag{5}$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{2} (\Theta_i - \Sigma_i) \tag{6}$$

最大主ひずみの方向 φ_{1i} は

$$\varphi_{1i} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{2\varepsilon_{xyi}}{\varepsilon_{xi} - \varepsilon_{yi}} \tag{7}$$

で求めることができ、最大せん断ひずみ速度の方向 φ_{gi} は

$$\varphi_{gi} = \varphi_{1i} + \frac{\pi}{4} \tag{8}$$

で求めた。

図9に面積ひずみ速度と最大せん断ひずみ速度を示す。面積ひずみ速度では、始良カ ルデラで大きな伸びがみられる一方、阿蘇山付近では縮みがみられる。最大せん断ひず み速度は別府湾を中心とした大分県で大きく、霧島山の東側でも大きくなっている。



図9 面積ひずみ速度(左)と最大せん断ひずみ速度(右)

図 10 左図に主ひずみ速度を示す。大分県別府湾を中心とした領域と九州中央部阿蘇山 周辺で縮みが卓越し、姶良カルデラでは膨張が卓越している。別府島原地溝帯では若干 南北方向の伸びが認められる。図 10 右図は国土地理院が 1883 年から 1994 年までの三 角測量により求めたひずみ変化である。九州全体で伸びが卓越しているが、特に別府島 原地溝帯では南北方向の伸長がみられる。これは GNSS により求めたひずみ速度の空間 分布とは異なるものである。これが時間的な変化を示しているかどうかは不明である。

図 11 左図に布田川断層帯・日奈久断層帯周辺の主ひずみ速度を、右図に最大せん断ひ ずみ速度の向きと大きさをベクトルで示す。主ひずみ速度を見ると日奈久断層帯高野一 白旗区間では伸長の方向と断層帯の方向が一致しているが、南になるにしたがって伸長 方向が反時計回りに回転していき、八代海区間では断層帯に直交する。最大せん断ひず み速度を見ると布田川断層帯では、断層帯に沿った方向に最大せん断ひずみ速度がみら れるが、日奈久断層帯では最大せん断ひずみ速度の方向は南にいくにしたがって断層帯 の走向と斜交している。



図 10 主ひずみ速度(左)、1883 年から 1994 年までの三角測量による九州の主 ひずみ(右)(国土地理院, 1997)。



図 11 布田川断層帯・日奈久断層帯とその周辺の主ひずみ速度(左)と最大せん断 ひずみ速度(右)。赤△は活火山を示す(気象庁, 2013)。オレンジ線は活断層を示 す(活断層研究会, 1991)。

九州地方では、年間数cmの定常的な水平変動があるため、平成28年熊本地震の余効変 動が収まってくると定常的な水平変動が卓越するようになる。このため、地震発生前の 長期間のデータがある観測点については定常変動(変位速度)を最小二乗法により推定 し、地震後の変動データから取り除いた。また、地震発生後に観測を開始した観測点、 気象庁の観測点については周辺の観測点の変位速度から内挿して変位速度を求め、地震 後の変動データから取り除いた。

平成28年熊本地震発生前から観測している観測点について、2004年1月から2015年 12月までのデータを使い、変位速度を式(1)を使って求めた。図12に得られた変位 速度を青いベクトルで示す。平成28年熊本地震発生後に設置した観測点と気象庁の観 測点については、周辺の観測点で、すでに変位速度が求められている観測点3点から5 点を使って、内挿した。内挿方法は、推定したい観測点と周辺の観測点の間の距離の逆 数を重みとして、変位速度の重み付平均を行い、変位速度を内挿した。内挿して求めた 変位速度ベクトルを赤で図12に示す。周辺の変位速度と調和的であり、地震後に設置 した観測点や気象庁観測点の変位速度としてよいと考える。



図 12 定常変動(変位速度)ベクトル。青いベクトルは変位データから推定した変 位速度を、赤いベクトルは推定した変位速度から内挿した変位速度を示す。

図 13、図 14 に変位速度を使って定常変動を除いた変動図を示す。図 13、図 14 とも南 北成分を見ると余効変動が地震発生後 3 年経った現在も継続しているように見える。震 源近くの観測点 MIFN では約 3 年で約 15 cm の変動が観測された。しかし、約 8 ヵ 月でお よそ 11 cm の変動があったので、変動速度は小さくなっていることがわかる。図 13、図 14 ともに変動速度が小さくなった 2017 年 2 月ころより余効変動に加えて 1 年周期の変 動が顕著になってきた。図 13 では 0 GWA や YFTM の東西成分、図 14 では KHMD の東西成 分では、2016 年 7 月、2017 年 7 月にピークを持つ変動があることがわかる。すなわち、 5 月頃から東方向へ変動し、7 月頃に最も東の位置にあり、その後西へ変動する。この 変動が 2 年ほぼ同じ時期に表れており、年周変化と考えられる。図 13 に示した日奈久 断層帯の東側の観測点では、平成 28 年熊本地震の地震時変動と同じく南西方向への変 動が余効変動として観測されている。日奈久断層帯の地震時に滑ったと考えられる領域 よりも南にある観測点については、東西方向で余効変動は年周よりも小さい。図 14 に 示した布田川断層帯の北側にある観測点の変動は、北西方向である。地震時に変動した と考えられる日奈久断層帯西側の観測点では東西方向で 2016 年7月あるいは8月頃ま での余効変動が顕著である。図 13、図 14 とも 2016 年 9月頃に上下成分でステップがあ るように見える。これは解析上の問題と考えているが、原因は不明である。



図 13 日奈久断層帯南東側の GNSS 観測点で観測された余効変動(2016 年4月 17 日~2019 年3月 31 日)。定常変動を除いている。(a)南北成分、(b)東西成分、(c) 上下成分。観測点の位置を右側の図に示す。上下成分の 2016 年 9 月のステップ(黒 矢印)は原因不明である。黒丸で囲ったステップはアンテナ交換による。



図 14 日奈久断層帯北西側の GNSS 観測点で観測された余効変動(2016 年4月 17 日~2019 年3月 31 日)。定常変動を除いている。(a)南北成分、(b)東西成分、(c) 上下成分。観測点の位置を右側の図に示す。上下成分の 2016 年 9 月のステップ(黒 矢印)は原因不明である。

本事業では、日奈久断層帯八代海区間での地震後の地殻変動を明らかにするために、 2017 年3月に鹿児島県長島町獅子島に GNSS 連続観測点を設置した。観測点の位置は図 4に赤四角で示す。今年度も獅子島観測点(SSJM)における観測を継続した。途中 2018 年1月9日から2月24日まで、2018 年12月23日から2019 年2月4日までは受信機の 電源 0FF による欠測があるが、他の期間は順調に観測が継続された。図15 に SSJM の変 位速度を最小二乗法を用いて計算し、それを定常変動として取り除いた時系列変化を示 す。年周変化とみられる変動が観測されているがその他には顕著な地殻変動は観測され ていない。



図 15 獅子島観測点 (SSJM) の時間変化。定常変動は取り除かれている。期間は 2017 年3月10日~2019年3月31日まで。

SSJM 観測点の近傍にある GEONET 観測点2点、芦北観測点(950468)と出水観測点(970834)により3角形を形成し、藤井・他(1986)の方法により一日ごとのひずみを計算した。図 16(a)に観測点配置図を、図 16(b)に最大せん断ひずみと面積ひずみの時間変化を示す。ばらつきはあるが最大せん断ひずみ、面積ひずみともほぼ一定であり、10⁻⁸を超える変化はないことがわかった。



図 16 (a)ひずみを計算に使用した観測点(赤丸印)。黒丸は周辺の GEONET 観測点。(b)計算された最大せん断ひずみ(赤十字印)と面積ひずみ(緑× 印)の時間変化。

観測された余効変動の特徴を抽出するために、余効変動の時定数の推定を行った。余 効変動は断層面上で発生するアフタースリップと断層周辺の下部地殻やマントルの粘 性緩和で発生すると考える。粘性緩和による変動は緩和時間を*d*とし、

$$u = a \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{d}}\right) \tag{9}$$

で表せるとする。ここで、uは変位、tは時刻、aは振幅を示す(たとえば、Segall, 2010)。 また、アフタースリップは緩和時間を τ とし、

$$u = a \cdot ln \left(1 + \frac{t}{\tau} \right) \tag{10}$$

で表される(Marone et al., 1991)。観測された余効変動において、アフタースリップ が粘性緩和よりも早期に収束すると考え、アフタースリップと粘性緩和が同時に進行し ている期間 I と粘性緩和のみが進行している期間 II にわけ、それぞれの期間を以下に 示す式(11)と(12)で表されると考える。

$$u = a \cdot \ln\left(1 + \frac{t}{\tau}\right) + b + c \cdot \left(1 - e^{-t/d}\right)$$

$$u = b + c \cdot \left(1 - e^{-t/d}\right)$$
(11)
(12)

ここで、aはアフタースリップの振幅、bは切片、cは粘性緩和の振幅を、τとdはアフタースリップと粘性緩和の時定数を示す。また、期間 I と期間 II の境界の時刻について も未知量とし、この境界の時刻とアフタースリップの時定数τは各観測点の各成分で同じ と仮定した。各観測点の各成分の振幅*a*と*c*、切片*b*、粘性緩和の時定数*d*及び各成分共通 のアフタースリップの時定数と期間 I と期間 II の境界時刻を Simulated Annealing 法 (Kirkpatrick et al., 1983)を用いて求めた。

日奈久断層帯の東側にある観測点7点と西側にある4点の合計 11 点の余効変動に対 して、式(11)と式(12)の係数をSimulated Annealing法で求めた。アフタースリッ プの緩和時間τは1.22日で、アフタースリップの継続期間を表す期間 Iと期間 II の境界 は地震後約50日(49.98日)であった。粘性緩和の緩和時間は表2に示す。NS 成分に 比べ EW 成分の方が多くの観測点で長いという特徴がある。図17と図18に余効変動変 化とアフタースリップと粘性緩和でモデル化した時系列を示す。Simulated Annealing 法によるフィッティングはよくあっている。ただし、図18(d) SRNI 観測点の南北成分 についてはオフセットがあるように見える。これはアフタースリップの振幅が大きく推 定され、地震直後に大きな余効変動が発生したモデルとなっていることによると考えら れる。アフタースリップと粘性緩和でモデル化した時系列は期間 I と期間 II の境界で 不連続が発生している。これは期間 I と期間 II の境界でモデル式の形が異なることが 原因である。

	NS 成分(日)	EW 成分(日)			
MIFN	297.0	452.8			
NNTK	324.6	979.4			
TYNO	457.6	511.5			
KTNJ	312.3	509.0			
1169	652.8	548.2			
MRTK	313.4	518.8			
OGWA	291.3	705.2			
1071	100.0	612.9			
FUTO	586.2	274.0			
0465	575.6	332.7			
SRNI	827.0	490. 4			

表2 粘性緩和の緩和時間。



図 17 余効変動の観測値とアフタースリップと粘性緩和でモデル化した時系列。 (a)MIFN、(b)NNTK、(c)TYNO、(d)KTNJ、(e)1169、(f)MRTK、(g)OGWA



図 18 余効変動の観測値とアフタースリップと粘性緩和でモデル化した時系列。 (a)1071、(b)FUT0、(c)0465、(d)SRNI

期間 I と期間 II において Simulated Annealing 法を使って求めた値を使い、アフター スリップによる変位(期間 I) と 1000 日間の粘性緩和による変位を計算した。ベクトル を図 19 に示す。粘性を Maxwell モデルとすると緩和時間は粘性係数を剛性率で割った ものとなる (たとえば、Segall, 2010)。剛性率を 3×10^{10} Paとすると表 2 で示した緩和 時間の対応する粘性率は $2.6 \times 10^{17} \sim 2.5 \times 10^{18}$ Pa sとなる。

図 19 に示したアフタースリップによる各観測点での変位を用いて地震時断層面上で のアフタースリップ量を最小二乗法により求めた。断層の位置や断層形状については、 地震時変動と同じ値を用いた(表1、図3)。表3に布田川断層帯と日奈久断層帯の地 震断層上のすべり量を示す。図 20 には、アフタースリップの水平変位の観測値と計算 値を示す。Shirahama et al. (2016)は地震後 12 日間で約 10 cmのアフタースリップを 地表に現れた日奈久断層帯の高野一白旗区間の北部地域の地震断層から見出している。 日奈久断層帯の右横ずれすべり量から平均すべり量を計算し、12 日間でのすべり量を求 めると約5 cmである。

双 []		ハノノノ里。
	すべり量 (m)	すべり角 (度)
布田川断層帯	0.145	-172
日奈久断層帯	0.177	-172

表3 断層面上でのアフタースリップ量。



図 19 アフタースリップと粘性緩和による変位のベクトル図。(左)アフタースリ ップによる変位(地震発生から約50日まで)。(右)粘性緩和による変位(地震発生 から1000日まで)。



図 20 アフタースリップによる変位のベクトル図(青矢印)。赤矢印は地震時断層 上でアフタースリップが生じたときの計算値。

つぎに図 19 に示したアフタースリップによる各観測点での変位を用いて、Simulated Annealing 法(Kirkpatrick et al., 1983)によりアフタースリップを発生させた布田 川断層帯と日奈久断層帯の断層を求めた。求めた断層パラメータを表4に示す。図 21 にアフタースリップによる観測点での変位と推定された断層パラメータから計算され た観測点での変位を示す。



図 21 アフタースリップによる変位のベクトル図 (青矢印)。赤矢印は推定さ れた断層パラメータにより計算された観測点での変位 (赤矢印)。星印は平成 28 年 4 月 16 日に発生した M7.3 の地震の気象庁が決定した震央を示す。

	経度	緯度	深 さ	すべり	すべり	長さ	幅(km)	走向	傾 き
	(度)	(度)	(km)	量 (m)	角(度)	(km)		(度)	(度)
	*	*			* *				* * *
布	130. 9355	32.8477	0.1	0.090	-95	41.0	18.3	249	55
田									
川									
断									
層									
帯									
日	130. 7912	32.7146	0.1	0.128	-174	29.4	11.4	215	89
奈									
久									
断									
層									
帯									

表4 推定された断層パラメータ

*:緯度経度は断層上端中央の位置の緯度経度を示す。

**: すべり角は、下盤に対する上盤のすべり方向を、断層面上で走向から反時計 回りに測った角度を示す。

***:断層面の傾きは、走向に対し右側に傾き下がる角度(伏角)を示す。

平成28年熊本地震による地殻変動データからは、既に国土地理院(2016)により地震 時断層モデルが提出されている。また、本事業では、余震の高精度震源決定に基づいて、 震源断層の推定がなされている(光岡・他,2018)。そこで、今回求めた地震時断層お よびアフタースリップが生じた断層を、既提出の断層モデルと比較してみる。

図 22 から 24 に GNSS データから求めた地震時断層、アフタースリップを生じた断層、 余震分布から求めた断層形状(光岡・他, 2018)及び国土地理院(2016)による布田川 断層帯・日奈久断層帯に相当する地震時断層を示す。布田川断層帯及び日奈久断層帯と も4つの断層モデルはほぼ重なっている。しかし、布田川断層帯ではアフタースリップ を生じた断層が他の3つに比べて広く推定されている。これは布田川断層帯周辺に明瞭 な余効変動を観測した観測点が少なく、断層形状を詳細に決めることができないためと 考えられる。図 23 は布田川断層帯、図 24 は日奈久断層帯に推定された断層の断面図で ある。布田川断層帯では、傾斜は4モデルともほぼ等しいが、日奈久断層帯では、余震 分布による断層形状に比べて、今回求めた地震時断層およびアフタースリップを生じた 断層の傾斜がほぼ 90 度と急になっていることがわかる。また、日奈久断層帯では、国 土地理院(2016)によるモデルも含め、地殻変動データから求めた断層モデルは地形・ 地質調査による地表の断層トレースとほで一致するが、余震分布から求めた断層モデル をそのままの傾斜角で地表へ延長すると、地表の断層トレースとは一致しない。



図 22 地震時断層(青)、アフタースリップを生じた断層(赤)、余震分布から推定された断層(光岡・他, 2018)(緑)及び国土地理院(2016)による 地震時断層(紫)の地表面への投影。



図 23 布田川断層帯の地震時断層(青)、アフタースリップを生じた断 層(赤)、余震分布から推定された断層(光岡・他, 2018)(緑)及び国 土地理院(2016)による地震時断層(紫)のアフタースリップを生じた 断層の走向方向の直交方向(N152°E)から見た断層(左)と走向方向 (N242°E)から見た断層(右)を示す。



図 24 日奈久断層帯の地震時断層(青)、アフタースリップを生じた断 層(赤)、余震分布から推定された断層(光岡・他, 2018)(緑)及び国 土地理院(2016)による地震時断層(紫)のアフタースリップを生じた 断層の走向方向の直交方向(N122°E)から見た断層(左)と走向方向 (N212°E)から見た断層(右)を示す。

以上のように各断層モデルは、アフタースリップを生じた断層を除くと、走向はほぼ 一致しているものの、断層サイズや傾斜は一致していない。そこで、これらの違いの有 意性を検証するために、余震分布から推定した断層モデルで地震時の地殻変動を説明で きるかを調べた。まず、余震分布から決定した断層形状(光岡・他,2018)を用いて、 地震時の断層面上のすべり量とすべり角を最小二乗法で求めた。そして、それらのすべ り量とすべり角を用いて、地表で観測される変位を計算した。表5に求まったすべり量 とすべり角を、図 25 に観測された地震時変動と求めたすべり量、すべり角から計算さ れる各観測点での変位を示す。最大の変位を観測した GEONET 長陽観測点(960701)を はじめ多くの観測点で、求めたすべり量を使って計算した理論値と観測値の一致は良く なく、余震分布から推定した断層モデルでは地震時の地殻変動を説明できないことがわ かった。

	すべり量 (m)	すべり角(度)
布田川断層帯	3.118	-170
日奈久断層帯	1.608	175

表5 余震分布から決定した断層上の地震時のすべり量とすべり角。



図 25 余震分布から決定した断層形状(光岡・他,2018)と推定したすべり量より計算された各観測点での変位(青ベクトル)とGNSSによる観測された地震時変動(赤ベクトル)を示す。四角は断層形状の地表投影を示し、太線が断層の浅部を示す。オレンジ色は活断層(活断層研究会,1991)を示す。星印は気象庁一元 化震源による平成28年4月16日に発生したM7.3の地震の震央を示す。

次に、余震分布による断層モデルと地殻変動データによる断層モデルの不一致の理由 について検討する。図 26 に国土地理院(2016)による地震時断層モデルにより計算さ れた変動と本事業でキネマティック解析により求めた地震時変動を示す。図 26 (左)は 布田川断層帯・日奈久断層帯に相当する2つの断層のみを使って計算した変動を示す。 この計算した変動は観測された地震時変動とあっていないことがわかる。図26(右)は 国土地理院(2016)による3つの地震断層モデルにより計算された変動を示す。この計 算した変動は観測された地震時変動とあっていることがわかる。このことは、国土地理 院(2016)の地震時断層モデルのうち布田川断層帯北東の南東傾斜の断層が観測された 地震時変動を説明するために非常に重要な役割を果たしていることがわかる。しかし、 光岡・他(2018)による余震分布から推定された断層には布田川断層北東の南東傾斜の 断層は含まれていない。平成28年熊本地震の強震動データから推定された震源断層モ デル(Asano and Iwata, 2016)も、光岡・他(2018)の余震分布による断層モデルと おおよそ一致しており、地震動の生成には布田川断層北東の南東傾斜の断層は寄与して いないと考えられる。このことは、地震波を発生させる高速の断層運動だけで地殻変動 が生じるわけではないことを示している。したがって、地震波を発生させる断層モデル と地殻変動を発生させる断層モデルは、必ずしも一致する必要はないと考えられる。

以上の検討から、地震波の発生を考えるモデルとしては、地殻変動から推定される断 層モデルよりも地震活動から推定された断層モデルあるいは地震波を発生させたと考 えられる断層モデルを使用することが適切であると考える。したがって、本事業で実施 する強震動シミュレーションに用いる震源断層モデルとしては、余震分布から推定され た断層モデルを用いることとした。



図 26 国土地理院(2016)の地震時断層により計算された地震時変動(青)と 本事業により求めた地震時変動(赤)との比較。(左)布田川断層帯及び日奈久 断層帯の2つの地震時断層により計算された地震時変動、(右)国土地理院 (2016)の3つの地震時断層により計算された地震時変動。

(c) 結論ならびに今後の課題

平成28年熊本地震発生後から約3年間、GNSSを使って余効変動を観測し、現在も余効変 動が継続していることを明らかにした。余効変動をアフタースリップと粘性緩和による変 動であると仮定し、それぞれの緩和時間を求めた。アフタースリップの継続期間は地震発 生後約50日間と推定された。粘性緩和にMaxwellモデルを適用し、剛性率の値を仮定する ことにより、粘性率を2.6×10¹⁷~2.5×10¹⁸Pasと見積もることができた。また、アフタ ースリップによる断層変位量を、地震時断層を仮定して求めた。右横ずれの変位量は布田 川断層帯で約12cm、日奈久断層帯で約21cmと見積もることができた。さらに、アフタース リップを生じた断層パラメータを推定し、GNSSデータより推定した地震時変動、光岡・他 (2018)による余震分布から求めた断層形状と比較を行った。

日奈久断層帯八代海区間周辺の地殻変動を明らかにする目的で鹿児島県長島町獅子島 にGNSS連続観測点を設置し、観測を継続した。定常変動を推定し、その残差変動には年周 変化とみられる変動があるが、他には顕著な変動は観測されていないことが分かった。

2004年1月から2015年12月までの九州大学、京都大学、鹿児島大学で設置したGNSS観測 点、国土地理院によるGEONET観測点のデータを解析し、ひずみ速度を求めた。布田川断層 帯付近および日奈久断層帯高野一白旗区間では最大せん断ひずみ速度の方向が断層帯の 走向方向に一致していたことが分かった。また、日奈久断層帯日奈久区間の南では、南に いくにしたがって最大せん断ひずみ速度の方向は断層帯の走向と斜交していることが明 らかとなった。平成28年熊本地震の地震断層と考えられる活断層では、その断層上で最大 せん断ひずみ速度が最大になっていたことがわかった。

(d) 引用文献

- Asano, K. and T. Iwata, Source rupture processes of the foreshock and mainshock in the 2016 Kumamoto earthquake sequence estimated from the kinematic waveform inversion of strong motion data, Earth, Planets and Space, 68,147, doi:10.1186/s40623-016-0519-9, 2016.
- 藤井陽一郎・杉田要・中根勝見,東北日本の地殻歪(I) 解析方法—,測地学会誌, 32,32-43,1986.
- 楮原京子・愛甲崇信・足立幾久・坂本泉・滝野義幸・井上直人・北田奈緒子,布田川・ 日奈久断層帯海域部における高分解能マルチチャンネル音波探査,活断層・古地震研究 報告,No. 11, 273-294, 2011.
- 活断層研究会編,新編日本の活断層,東京大学出版会,437pp,1991.
- Kirkpatrick, S., C. d. Gelat and M. P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, Science, 220, 671-680, 1983.
- 気象庁, 日本活火山総論 第4版, 1498pp, 2013.
- 国土地理院編,日本の地殻水平ひずみ,国土地理院技術資料,F1-No.10,1997 (国土地 理院ホームページ www.gsi.go.jp/cais/HIZUMI-hizumi.html).
- 国土地理院, 平成 28 年 (2016 年) 熊本地震, 地震予知連絡会会報, 96, 557-589, 2016.
- Marone, C. J., C. H. Sholtz and R. Bilham, On the mechanics of earthquake afterslip, Jour. Geophys. Res., 96, 8441-8452, 1991.

- 光岡郁穂・松本聡・山下裕亮・中元真美・宮崎真大・酒井慎一・飯尾能久・2016 年熊本 地震合同地震観測グループ, Change in state of stress around Hinagu fault zone through the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, 日本地球 惑星科学連合 2018 年大会, SCG57-26, 2018.
- Ozawa, S., H. Yarai, T. Imakiire and M. Tobita, Spatial and temporal evolution of the long-term slow slip in the Bungo Channel, Japan, Earth Planets Space, 65, 67-73, 2013.
- 佐藤俊也,三浦哲,立花憲司,佐竹義美,長谷川昭,稠密 GPS 観測網により観測された 東北奥羽脊梁山地の地殻変動,地震第2輯,55,181-191,2002.
- Segall, P., Earthquake and Volcano deformation, Princeton University Press, 432pp, 2010.
- Shirahama, Y., M. Yoshimi, Y. Awata, T. Maruyama, T. Azuma, Y. Miyashita, H. Mori, K. Imanishi, N. Takeda, T. Ochi, M. Otsubo, D. Asahina and A. Miyakawa, Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, Earth, Planets and Space, 68:191, Doi 10.1 186/s40623-016-0559-1, 2016.
- Takasu, T. and A. Yasuda, Kalman-Filter-Based Integer Ambiguity Resolution Strategy for Long-Baseline RTK with Ionosphere and Troposphere Estimation, Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (Ion GNSS 2010), Portland, OR, September 2010, 161-171, 2010. 宇津徳治, 地震学 第3版, 共立出版, 376pp, 2001.
- Wessel, P., W. H. F. Smith, R. Scharroo, J. Luis, and F. Wobbe, Generic Mappaing Tools: Improved Version Released, EOS Trans. AGU, 94, 409-410, 2013. DOI:1002/2013E045001
別表 各観測点の属性。

観測 点名	観測点 コード	設置機関	経度(度)	緯度(度)	観測開始日(空欄は平 成28年4月14日以前 から観測、解析してい る観測点)
獅子島	SSJM	鹿児島大学	130. 2173	32.2793	平成 29 年 3 月 21 日
小野原	ONBR	国立大学法人 GNSS グル ープ	131. 2896	33. 3275	平成 28 年 4 月 18 日
湯平	YNHR	国立大学法人 GNSS グル ープ	131. 3392	33.1929	平成 28 年 4 月 19 日
野上	NGMK	国立大学法人 GNSS グル ープ	131. 2073	33. 2269	平成 28 年 4 月 19 日
小川	OGWA	国立大学法人 GNSS グル ープ	130. 7109	32. 5817	平成 28 年 4 月 18 日
不知火	SRNI	国立大学法人 GNSS グル ープ	130. 6561	32.6464	平成 28 年 4 月 18 日
二岡	FUTO	国立大学法人 GNSS グル ープ	130. 7920	32.8238	平成 28 年 4 月 19 日
画図	EZU_	国立大学法人 GNSS グル ープ	130. 7398	32.7675	平成 28 年 4 月 19 日
北中島	KTNJ	国立大学法人 GNSS グル ープ	130. 9382	32.7337	平成 28 年 4 月 18 日
御船	MIFN	国立大学法人 GNSS グル ープ	130.8004	32.7152	平成 28 年 4 月 18 日
七滝	NNTK	国立大学法人 GNSS グル ープ	130. 8539	32.7345	平成 28 年 4 月 18 日
豊野	TYNO	国立大学法人 GNSS グル ープ	130. 7497	32.6377	平成 28 年 4 月 15 日
護川	MRKW	国立大学法人 GNSS グル ープ	130. 8498	32.9106	平成 28 年 4 月 20 日
産山	UBUS	国立大学法人 GNSS グル ープ	131. 2177	32.9951	平成 28 年 4 月 19 日
田尻	UBUT	国立大学法人 GNSS グル ープ	131. 1739	33.0321	平成 28 年 4 月 19 日
波野	ASNM	国立大学法人 GNSS グル ープ	131. 2292	32.9322	平成 28 年 4 月 20 日
りんど うが丘	RNDG	国立大学法人 GNSS グル ープ	131. 1286	33.0776	平成 28 年 4 月 25 日

淮園	WYEN	国立大学法人 GNSS グル ープ	131. 1592	33.1941	平成 28 年 4 月 25 日
熊本大	KMU1	国立大学法人 GNSS グル ープ	130. 7282	32.8171	平成 28 年 4 月 26 日
二見	YFTM	国立大学法人 GNSS グル ープ	130. 5578	32.4035	平成 28 年 4 月 27 日
八代第 六中	YDRK	国立大学法人 GNSS グル ープ	130. 5793	32.4804	平成 28 年 4 月 27 日
姫戸	KHMD	国立大学法人 GNSS グル ープ	130. 4069	32.4406	平成 28 年 4 月 28 日
熊本 城西	KMJS	九州大学・東北大学・鹿 児島大学	130. 6329	32.7823	平成 28 年 8 月 20 日
宇土 網田	UTOD	九州大学・東北大学・鹿 児島大学	130. 5498	32.6712	平成 28 年 7 月 7 日
八代 八竜山	YTHT	九州大学・東北大学・鹿 児島大学	130. 6378	32.4529	平成 28 年 7 月 7 日
八代 大島	YTOS	九州大学・東北大学・鹿 児島大学	130. 5545	32. 5379	平成 28 年 7 月 7 日
浅地	ASAJ	九州大学・京都大学・鹿 児島大学	131. 4316	33.0225	
阿蘇火 山博 物館	ASOM	九州大学・京都大学・鹿 児島大学	131.0520	32.8855	
別府	BGRL	九州大学・京都大学・鹿 児島大学	131. 4858	33.2845	
別府唐 木山	BKRK	九州大学・京都大学・鹿 児島大学	131. 4864	33. 3882	
阿蘇 深葉	AFKB	九州大学・京都大学・鹿 児島大学	130. 9761	33.0076	
高森 草部	TKSB	九州大学・京都大学・鹿 児島大学	131. 2142	32.7851	
五ヶ瀬 鞍岡	GKRK	九州大学・京都大学・鹿 児島大学	131. 1635	32.6478	
日之影 八戸	НҮАТ	九州大学・京都大学・鹿 児島大学	131. 4336	32.6224	
美里 励徳	MRTK	九州大学・京都大学・鹿 児島大学	130. 9190	32.6398	
由布 阿南	YANN	九州大学・京都大学・鹿 児島大学	131. 4531	33.1864	
別府 亀川	BKGO	九州大学・京都大学・鹿 児島大学	131. 4897	33. 3262	

久住	KUJ_	京都大学・九州大学	131.2364	33.0522	
出水	IZMI	鹿児島大学・九州大学・ 京都大学	130. 3472	32.0554	
紫尾山	SHIB	鹿児島大学・九州大学・ 京都大学	130. 3505	31.9714	
泊	TOMR	鹿児島大学・九州大学・ 京都大学	130. 3711	31.9408	
湯山	J790	気象庁	131.4511	33.3255	
草千里	J824	気象庁	131.0523	32.8856	
古坊中	J823	気象庁	131.0734	32.8805	
砂千 里浜	J821	気象庁	131. 0894	32.8744	
仙酔峡	J825	気象庁	131.1012	32.8975	
星生山 北山腹	J813	気象庁	131. 2296	33.1033	
上野	J810	気象庁	131.2246	33.1325	
坊ガ ツル	J811	気象庁	131. 2617	33.0998	
牧ノ 戸峠	J812	気象庁	131. 2087	33.0960	
古賀	940087	国土地理院 GEONET	130. 4768	33.7307	
安岐	940088	国土地理院 GEONET	131.6914	33.4615	
日田	940089	国土地理院 GEONET	130.9678	33.3311	
大分 佐伯	940090	国土地理院 GEONET	131. 8764	32.9246	
玄海	940091	国土地理院 GEONET	129.8503	33.4761	
千丁	940093	国土地理院 GEONET	130. 6456	32.5464	
日向	940094	国土地理院 GEONET	131.6323	32.4455	
佐土原	940095	国土地理院 GEONET	131.4697	32.0218	
阿久根	940096	国土地理院 GEONET	130.1901	32.0132	
枕崎	940098	国土地理院 GEONET	130. 2995	31.2646	
内之浦	940099	国土地理院 GEONET	131.0875	31.2585	
前原	950450	国土地理院 GEONET	130. 2508	33.5361	
筑紫野	950451	国土地理院 GEONET	130. 5220	33.5004	
小石原	950452	国土地理院 GEONET	130.8288	33.4655	
八女	950453	国土地理院 GEONET	130. 5647	33.2059	
佐賀	950454	国土地理院 GEONET	130. 2687	33.2749	
佐賀 鹿島	950455	国土地理院 GEONET	130. 0942	33.0985	

上対馬	950456	国土地理院 GEONET	129.4821	34.6556	
美津島	950457	国土地理院 GEONET	129.3115	34.2682	
石田	950458	国土地理院 GEONET	129.7347	33.7427	
平戸	950459	国土地理院 GEONET	129.5370	33.3622	
西海	950460	国土地理院 GEONET	129.6907	33.0631	
長崎 国見	950461	国土地理院 GEONET	130. 2713	32.8707	
福江	950462	国土地理院 GEONET	128.8431	32.6694	
加津佐	950463	国土地理院 GEONET	130.1546	32.6369	
玉名	950464	国土地理院 GEONET	130. 5477	32.9335	
熊本	950465	国土地理院 GEONET	130.7648	32.8421	
清和	950466	国土地理院 GEONET	131.0993	32.7407	
天草	950467	国土地理院 GEONET	129.9873	32.3262	
芦北	950468	国土地理院 GEONET	130. 5068	32.2992	
熊本 相良	950469	国土地理院 GEONET	130.8026	32.2387	
大分 国見	950470	国土地理院 GEONET	131.5642	33.6712	
本耶 馬渓	950471	国土地理院 GEONET	131.1689	33.4962	
湯布院	950472	国土地理院 GEONET	131.3473	33.2540	
佐賀関	950473	国土地理院 GEONET	131. 7981	33.2394	
久住	950474	国土地理院 GEONET	131.2861	33.0090	
大分 三重	950475	国土地理院 GEONET	131. 5878	32.9869	
北川	950476	国土地理院 GEONET	131.7568	32.7040	
日之影	950477	国土地理院 GEONET	131. 3276	32.6848	
椎葉	950478	国土地理院 GEONET	131.1489	32.4566	
西米良	950479	国土地理院 GEONET	131.1852	32.2459	
川南	950480	国土地理院 GEONET	131. 5159	32.1704	
野尻	950481	国土地理院 GEONET	131.0786	31.9651	
都城	950482	国土地理院 GEONET	131.0215	31.7403	
北郷	950483	国土地理院 GEONET	131.3689	31.6766	
串間1	950484	国土地理院 GEONET	131.2174	31.4694	
鹿児島 大口	950485	国土地理院 GEONET	130. 5978	32.0575	
牧園	950486	国土地理院 GEONET	130. 7597	31.8555	

鹿児島 鹿島	950487	国土地理院 GEONET	129. 7954	31.7687	
串木野	950488	国土地理院 GEONET	130. 2782	31.7174	
鹿児島 福山	950489	国土地理院 GEONET	130. 8361	31.6174	
指宿	950490	国土地理院 GEONET	130.6404	31.2352	
佐多	950491	国土地理院 GEONET	130. 7231	31.1062	
直方	960685	国土地理院 GEONET	130.7496	33.7455	
行橋	960686	国土地理院 GEONET	131.0165	33.6974	
田川	960687	国土地理院 GEONET	130.8239	33.6405	
田主丸	960688	国土地理院 GEONET	130.7012	33.3272	
山内	960689	国土地理院 GEONET	129.9401	33.1960	
吉井	960690	国土地理院 GEONET	129.6900	33.2661	
宇久	960691	国土地理院 GEONET	129. 1255	33.2558	
若松	960692	国土地理院 GEONET	129.0264	32.8856	
愛野	960693	国土地理院 GEONET	130.1664	32.7957	
島原	960694	国土地理院 GEONET	130.3360	32.7930	
小浜	960695	国土地理院 GEONET	130.2167	32.7123	
深江	960696	国土地理院 GEONET	130.3523	32.7226	
西有家	960697	国土地理院 GEONET	130.2907	32.6607	
玉之浦	960698	国土地理院 GEONET	128.6194	32.6343	
熊本 小国	960699	国土地理院 GEONET	131.0629	33.1220	
鹿本	960700	国土地理院 GEONET	130.7486	33.0113	
長陽	960701	国土地理院 GEONET	130. 9962	32.8708	
泉	960702	国土地理院 GEONET	130. 7949	32.5767	
阿蘇	960703	国土地理院 GEONET	131.0934	32.9507	
高森	960704	国土地理院 GEONET	131. 1322	32.8450	
宇佐	960705	国土地理院 GEONET	131. 3566	33.5371	
日出	960706	国土地理院 GEONET	131. 5884	33.3499	
玖珠	960707	国土地理院 GEONET	131.1211	33.2703	
大分	960709	国土地理院 GEONET	131. 5795	33.2284	
前津江	960710	国土地理院 GEONET	130. 9157	33.1906	
北方	960711	国土地理院 GEONET	131. 5307	32.5571	
宮崎 南郷	960712	国土地理院 GEONET	131. 3340	32.3844	
新富	960713	国土地理院 GEONET	131. 4860	32.0691	

えびの	960714	国土地理院 GEONET	130. 8656	32.0477	
宮崎	960715	国十地理院 GEONET	131. 3063	31.8421	
田野					
串間 2	960716	国土地理院 GEONET	131. 3059	31.3991	
東	960717	国土地理院 GEONET	130. 1797	32.1971	
宮之城	960718	国土地理院 GEONET	130. 4397	31.9088	
桜島	960719	国土地理院 GEONET	130. 6519	31.6241	
鹿児島 2	960720	国土地理院 GEONET	130. 7085	31.5918	
鹿児島 3	960721	国土地理院 GEONET	130.6374	31.5522	
垂水	960722	国土地理院 GEONET	130. 6994	31.4962	
北波多	960770	国土地理院 GEONET	129.9549	33.3722	
中原	960771	国土地理院 GEONET	130. 4445	33.3465	
大村	960772	国土地理院 GEONET	129. 9897	32.9456	
大矢野	960773	国土地理院 GEONET	130. 4305	32.5817	
苓北	960774	国土地理院 GEONET	130. 0852	32.5245	
栖本	960775	国土地理院 GEONET	130. 3236	32.4263	
鹿児島	000770		100 4005	01 6751	
郡山	960776	国工地理阮 GEONEI	130. 4695	31.0751	
笠沙	960777	国土地理院 GEONET	130. 1358	31.4159	
福岡 高田	970831	国土地理院 GEONET	130. 4650	33.0974	
外海	970832	国土地理院 GEONET	129.7207	32.8396	
大分 九重	970833	国土地理院 GEONET	131.2068	33.1278	
出水	970834	国土地理院 GEONET	130. 3607	32.0984	
鹿児島 川内	970835	国土地理院 GEONET	130. 2390	31.9062	
樋脇	970836	国土地理院 GEONET	130. 4080	31.7960	
姶良	970837	国土地理院 GEONET	130. 5996	31.8241	
北九州 1	021060	国土地理院 GEONET	130. 7224	33.9297	
北九州 2	021061	国土地理院 GEONET	130.9711	33.8670	
福岡	021062	国土地理院 GEONET	130. 2969	33.6831	
桂川	021063	国土地理院 GEONET	130. 6757	33.5798	
築城	021064	国土地理院 GEONET	130. 9954	33.5647	
二丈	021065	国土地理院 GEONET	130.0793	33.5030	

多久	021066	国土地理院 GEONET	130.0972	33.2920	
川棚	021067	国土地理院 GEONET	129.8630	33.0734	
長崎2	021068	国土地理院 GEONET	129.9590	32.7683	
三加和	021069	国土地理院 GEONET	130.6218	33.0601	
菊池	021070	国土地理院 GEONET	130.8727	32.9959	
城南	021071	国土地理院 GEONET	130. 7484	32.7092	
五木	021073	国土地理院 GEONET	130.8274	32.3961	
新和	021074	国土地理院 GEONET	130. 1799	32.3674	
球磨	021075	国土地理院 GEONET	130. 6565	32.3435	
熊本 水上	021076	国土地理院 GEONET	130. 9864	32.2924	
豊後 高田	021077	国土地理院 GEONET	131. 5212	33.5143	
院内	021078	国土地理院 GEONET	131.2917	33.3838	
臼杵	021079	国土地理院 GEONET	131.7484	33.0962	
米水津	021080	国土地理院 GEONET	132.0391	32.9364	
緒方	021081	国土地理院 GEONET	131.4415	32.8989	
宇目	021082	国土地理院 GEONET	131.6292	32.8522	
諸塚	021083	国土地理院 GEONET	131.3647	32.5279	
東郷	021084	国土地理院 GEONET	131. 5830	32.3162	
西都	021085	国土地理院 GEONET	131.3475	32.1119	
綾	021086	国土地理院 GEONET	131.2545	32.0018	
都城 2	021087	国土地理院 GEONET	130.9770	31.8778	
宮崎	021088	国土地理院 GEONET	131.4701	31.7860	
隼人	021089	国土地理院 GEONET	130. 7357	31.7438	
大隅	021090	国土地理院 GEONET	130.9983	31.5646	
金峰	021091	国土地理院 GEONET	130.3401	31.4503	
喜入	021092	国土地理院 GEONET	130. 5406	31.3772	
大根占	021093	国土地理院 GEONET	130.8671	31.2428	
直入A	041137	国土地理院 GEONET	131. 3840	33.0788	
長崎A	081168	国土地理院 GEONET	129.7770	32.5817	
矢部A	081169	国土地理院 GEONET	130. 9872	32.6752	
鹿屋	942004	国土地理院 GEONET	130.8786	31.4253	