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	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	技術補佐員	田村 亮子
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	技術補佐員	石本 美鈴
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	非常勤研究員	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	テクニカルスタッフ	手操 佳子
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	大学院生	宮町 凛太郎
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	大学院生	塚本 果織
国立大学法人九州大学大学院理学研究院	大学院生	森田 花織
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殻構造モデルを作成する。この地 殻構造モデルと、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の検討を行う。

(2) 平成 29 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、解析結果を総合し て、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 をまとめた。その結果、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が明らか になった。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。

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 WSINV3DMT インバージョンコード(Siripunvaraporn and Egbert, 2009)を使 用し、80 観測点のデータを入力とした 3 次元解析を行った。平成 30 年度に予定している 日奈久断層帯および宇土半島周辺での広帯域 MT 調査のため、その周辺地域において予備

調査を行い、3次元解析の結果と併せて平成30年度の探査計画を策定した。

さらに、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の地殻変動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。

(b) 業務の成果

1) 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、平成28年度に引き続き、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) 、本年度の震源再決定ではShito et al. (2017)による構造を用いた。これにより、 平成28年度よりも精度の高い震源分布を得た。



図1. 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2に示される、熊本地震の断層モデルである。



図2. 震源分布から推定された熊本地震の断層面 (Mitsuoka et al., 2018 による)。色つ きの四角形が断層面を表す。四角形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1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)。これらは、平成28年度の解析結果 と同様であるが、今年度の結果ではやや不明瞭ながら、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1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1のA5~A6断面)。これらの面状構造は今年度において 余震解析を進めたこと、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 るものである。これらの震源分布から推定される断層モデル(Mitsuoka et al., 2018)を 図2に示す。推定された断層面の特徴から、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、走向は日奈久断層帯とほぼ同じであるが東南東傾斜の断層(図2中の H inagu 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1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。

2) 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 年度に引き続き、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3に解析領域(熊本周辺)を示す(Shito et al., 2017より引用)。図4には図3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 析領域に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。速度を推定するグリッドは震源領域において水平方向5kmごと、深さ方向には 2.5 km ごとに配置し、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、熊本地震前(背景)の活動も熊本地震の活動も低速度・高 Vp/Vs 域(図4 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。

257



図3 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 は活断層およびカルデラの外形を示す。



図4. 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3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。したがって、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。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、通常で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 はせん断破壊強度が低下し、すべりを起こすことが可能である。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ている。そのため、地震時の断層上のすべり 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5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)による地震時すべり方向の大 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、赤い領域でも大きくすべりが起こり、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5.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3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6)。図6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、この応力変化を考 察すると、熊本地震によって断層近傍のせん断応力が減少したこと、この地域の差応力は 数十 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6. 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。

以上は、地震観測データの解析による結果であるが、これらに加え、MT 法による比抵抗 構造についても既存のデータの再解析により推定し、熊本地震の本震や M4.7 以上の規模 の大きな地震の震源と比較した。平成 28 年度は 1 次元構造解析に留まっていたが、平成 29 年度は 3 次元の解析を行った。熊本地震震源域の 3 次元比抵抗構造解析の結果、以下の ことが示唆された。

i) 震源域の地下には低比抵抗領域が存在し、2016年4月14日の前震、本震、さらに2000年6月の益城町付近でのM5.3 地震、いずれも震源は低比抵抗領域の縁に位置している(図7)。

ii)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。

iii) 熊本地震の大すべり域 (Asano and Iwata, 2016) は、低比抵抗に囲まれた高比抵抗領域と対応している(図 8)。

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、流体が豊富に存在する低比抵抗体が破壊の進展を阻むことを示唆している。こ れらの成果はいずれも、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 る可能性を示すものである。



図7.3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 月の M5.3 地震の震源をそれぞれ示 している。茶実線は活断層を(活断層研究会編, 1991)、白実線は阿蘇カルデラを示す。2 つ の破線は、布田川断層帯と日奈久断層帯の方向を示している。



図8.3 次元解析により推定した比抵抗構造(鉛直断面)。断面の走行は図7の布田川断層 帯に沿った方向の破線に相当する。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)をそれぞれ示している。実線は熊本地震本震 の推定すべり分布を2,3,4,5mのコンターで表している(Asano and Iwata, 2016)

電磁気学的調査に関しては、平成 29 年度は、平成 30 年度に実施を予定している MT 法比 抵抗探査の具体的な実施計画の策定に向けて、日奈久断層帯、宇土半島周辺での予備調査 も実施した。この予備調査からは、熊本市電に代表される人工ノイズの影響が広帯域 MT 探 査に致命的ではなく、長期間観測を行えばこの地域でも良質の周波数応答関数が得られる ことを確認することができた。

3) 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 2016 年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、未破壊だった日奈久断 層帯・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 月に発生したマグニチュード5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。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9、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の西約1kmの地点で変位べ クトルの向きが反転していることなどの特徴から、本震時の断層モデルが提出された(図 10, 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(松島・他,2016)。



図9.日奈久断層帯・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 繰り返し観測(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10 断層モデルとそれから推測される変位と GNSS 観測値の比較。A) 2016 年 5 月に発 表された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 断層は 2016 年 4 月 14 日 Mj6.5(北北東側)および 4 月 15 日 Mj6.4 (南南西側)の震源と考えられている。B) GNSS 観測値と推定値が最もあうように改良 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 2km、南南西に 1km 延びていると推定された。C) 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)で公開された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進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に観測諸元をしめ 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 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 年後も余効変動が少しずつ小さくなりつつも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、注意深くみると、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9)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、観測されたべ 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断層の深部がすべっている可能性があ る。また、変位ベクトルのパターンからは、熊本地震の1年後においても、GNSS 測線を越 えて南西側(日奈久区間)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。

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	千厷	四 笙 三 角 占	石柱	3.0°	36'	29 9"	130°	37'	42 A"	3
KM14	* 二十種	四等三角加四	石柱	32°	35'	23.5	130°	38'	12.1 31.4"	5
KM15	近無田	日 <u>守</u> 二月二 三	石柱	32°	34'	36.8"	130°	30,	51.7"	7
KM16	下十三	— 寸 — 円 示	全国ピン	32°	34'	06.8"	130°	40'	30.7"	7
KM17	티미끼	九八金卓点 三竿三鱼占	並属レン	ე <u>ე</u> ეე⁰	04 99	20.0	130°	40	30.7 25.2"	110
	上北川工	二守二月尽	つた	ა∠ ეე⁰	აა ეე,	30.1 50.0"	130 120°	41	30.3 10.9"	110
KM18	立种峡	四寺二月只	石仕	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~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
	塩化チオニールリチウム電池



図 11 GNSS 観測風景 A) KM01 は国土地理院四等三角点を利用している。B) KM05 観測点は、 金属標識を設置してある。C) KM08 観測点は国土地理院四等三角点を利用しているが、石柱 であるため、設置精度は数 mm となる。D) KM10 観測点の金属標識。求芯にはレーザー式の 求芯器を使用しており、GNSS アンテナの設置精度は 2~3mm 程度と高精度になっている。



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。

(c) 結論ならびに今後の課題

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、熊本地震の高精度震 源再決定を行った結果、複雑な断層構造が明らかになった。特に、最大前震や本震の震源 (破壊開始地点)付近の断層は複雑であり、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、それが日奈久断層や布田川断層に乗 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 波速度構造および3次元比抵抗構造と震源分布の比較から、地震は低速度域を避けて発生 していることや、規模の大きな地震は低比抵抗領域の縁で発生してい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。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つつある。これらの結果は、今後当該地域で発生する内陸地 震の断層モデルの作成や地震動の予測にとって重要な基礎データとなると考えられる。

今後も、観測データの蓄積と解析手法の改良により、精度を向上させるとともに、他の サブテーマの調査で明らかになった地質学・地形学的特徴やひずみ場の特徴、構造探査の 成果などを総合して結果の検討と解釈を行い、地殻構造モデルと断層モデルを構築する必 要がある。特に、電磁気学的調査に関しては、これまでに蓄積されたデータを用い推定し た3次元比抵抗構造と地震の空間的な対応から比抵抗構造が地震予測に有効であることが 示唆されたため、今後は実際に広帯域 MT 調査を実施し、比抵抗構造と地震の対応の信頼性 を向上させる。日奈久断層帯、宇土半島周辺においては既存の広帯域 MT 観測データが乏し いため、平成 30 年度に重点的な調査を行う。本震で破壊した布田川断層については、断層 浅部を対象とした AMT 稠密観測を行い比抵抗構造から断層破砕帯を検出して、地表付近に まで大すべりが達した地域と、そうでない地域の断層破砕帯の差異を検討することも課題 である。

(d) 引用文献

Asano, K. and T. Iwata (2016), 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 Space, 68:147, doi:10.1186/s40623-016-0519-9.

活断層研究会(1991),新編日本の活断層 分布図と資料,東京大学出版会,437p.

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. (2018), Prestate of Stress and Fault Behavior During the 2016 Kumamoto Earthquake (M7.3), Geophysical Research Letters, 45(2), 637-645. 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(2018), 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.

松島健, 手操佳子, 中尾茂, 清水洋, 松本聡, 中元真美, 内田和也 (2016), 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.

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(2018), 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.

Saiga, A., S. Matsumoto, K. Uehira, T. Matsushima, and H. Shimizu, (2010), Velocity structure in the crust beneath the Kyushu area, Earth Planets Space, 62, 449-462.

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, (2017), Seismic velocity structure in the source region of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, Japan, Geophysical Research Letters, 44(15), 7766-7772.

Siripunvaraporn, W. and Egbert, G., (2009), WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation. Phys. Earth. Planet. Int., 173(3-4): 317-329.

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(2016),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.

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

271

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理工学研究科	助教	八木原 寛
国立大学法人鹿児島大学理工学研究科	技能補佐員	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	准教授	伊藤 武男
火山研究センター		
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	寺石 眞弘
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明らかにした。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、長期余効変動の変動源モデルの検討を行う。日 奈久断層帯南部(八代区間)周辺の地殻変動の特徴の抽出を行う。GNSS による地震時 変動から推定した震源断層の形状、余効変動源、布田川断層帯・日奈久断層帯全域の ひずみ場をもとに、震源断層形状モデルの構築を目指す。

(2) 平成 29 年度の成果

(a) 業務の要約

平成28年熊本地震発生直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観測点での観測を、長期的な余効変動を明らかにする目的で継続した。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。また、国土地理院GEONET観測点や九州大学、京都大学、鹿 児島大学で設置したGNSS観測点のデータを収集し、布田川一日奈久断層帯とその周辺のひ ずみ速度の詳細を明らかにした。その結果、平成28年熊本地震が発生する前には最大せん 断ひずみ速度の方向が活断層の走向に一致していたことがわかった。

(b) 業務の成果

平成28年熊本地震発生直後から国立大学法人のGNSS観測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、平成28年熊本地震発生直後に地震活動が活発化した阿蘇 山の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、4 月28日までに合計21のGNSS連続観測点を設置し、観測を開始した。国土地理院が展開する GEONET観測網や九州大学、京都大学、鹿児島大学が共同で行っている観測点を含めたGNSS 連続観測点の配置を図1に示す。図1において緑丸で囲んだ観測点は、観測点を設置した 建物に大規模改修が実施されることとなったため、2017年8月31日に撤収を行った。



図1.九州中央部の GNSS 連続観測点配置図。黒四角は国土地理院が展開する 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 庁が決定した震央の位置を示す。赤丸は気象庁一元化震源の震央分布である。緑丸で囲ん だ観測点は 2017 年度撤収した。黒線は活断層(活断層研究会、1991)を示す。

平成28年熊本地震発生から2年がたとうとしている。この地域は年間数 cm の定常的 な水平変動があり、余効変動が収束してくると定常的な水平変動が優勢となる。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。図2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2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2. 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3、図4に変位速度を使って定常変動を除いた変動図を示す。図3、図4とも南北成 分を見ると余効変動が地震発生後2年近くた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1年11か月で約13cmの変動が観測された。しかし、約8ヵ月で およそ 11cm 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3、図4 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3では OGWA や YFTM の東西成分、図4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3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4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 3、図4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、原因は現在のところ不明である。



図3. 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~2018 年3月 15 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。



図4. 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~2018 年3月 15 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1 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日までは受信機の電源 OFF による欠測があるが、ほかの期間は順調 に観測が継続された。図5に周辺の観測点の変位速度から SSJM の変位速度を計算し、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。観測期間が1年であるため、年周 変化であるかどうかは今後さらに検討していく必要がある。



図5.獅子島観測点 (SSJM) の時間変化 (2017 年3月 10 日~2018 年3月 15 日)。

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。



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 線で囲まれた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。

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。この時式(1)を使用した。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(0zawa 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6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。

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7に求めた変位速度のコンター図を示す。ベクトルは950456(上 対馬)を固定点としてあらわ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950456(上対馬)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 $e(x_i, y_i)$ 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。



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。

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

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

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

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

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、姶良カ 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 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 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)。赤三角は活火山を示す(気象庁、2013)。オレンジ線は活断層を示す(活 断層研究会、1991)。

(c) 結論ならびに今後の課題

約2年間の余効変動を観測した。平成28年熊本地震の余効変動は現在もまだ継続して いることがわかった。日奈久断層帯東側の特に南北成分で大きな余効変動が生じているこ と、地震発生後の1年間よりも、2年目では余効変動としては鈍化していることも明らか になった。地震発生後2~3か月で大きな変化率の余効変動が収束している観測点もある ことから、このような時間変化を使って、今後アフタースリップと粘性緩和による変動と の分離を試みる。

日奈久断層帯八代海区間の地殻変動を明らかにするため鹿児島県長島町獅子島に設置 した GNSS 観測点での観測を継続した。顕著な地震後の変動は観測されていないが、年周変 動の可能性のある変動が得られており、さらに観測を継続し年周変動を取り除いて変動の 変化を検討できるようにする必要がある。

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。布田川断層帯付近では最大せん断ひずみ速 度の方向は断層帯の走向に一致している。日奈久断層帯高野一白旗区間でも最大せん断ひ ずみ速度の方向が断層帯の走向に一致している。南にいくにしたがって断層帯の走向と斜 交していることが明らかとなった。平成 28 年熊本地震の際に活動したと考えられる活断 層では、その断層上でせん断ひずみが最大になっていたことがわかった。

(d) 引用文献

活断層研究会編、新編日本の活断層、東京大学出版会、437pp、1991.

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).

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.

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 Mapping Tools: Improved Version Released, EOS Trans. AGU, 94, 409-210, 2013. DOI:10.1002/2013E045001

282