

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	非常勤研究員	志藤 あずさ
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、平成 28 年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 ヶ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 年熊本地震発生地震学的背景やこれらの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、サブテーマ 2-2 と共同で GNSS 連続観測を実施するとともに、繰り返し GNSS 観測の測線を増設して観測データを蓄積した。これらの観測に加えて、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する。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する。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变化の検出を試みる。また、平成 28 年度に布田川断層帯宇土区間において実施した反射法地震探査の結果を、上記の地殻応力場、深部地殻構造および地震活動と比較して、宇土区間で想定される地震の震源断層について推定する。

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、探査の準備を行う。

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 28 年度の成果

(a) 業務の要約

平成 28 年熊本地震の余震観測と GNSS 観測を実施してデータを蓄積するとともに、同地震の発生域や布田川・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考察した。また、熊本地震の活発な地震活動や複雑な震源断層など、同地震の特徴を明らかにした。

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。

(b) 業務の成果

1) 当該地域における地震研究成果の整理に基づく平成 28 年熊本地震発生の背景の調査

九州における内陸地震や平成 28 年熊本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平成 28 年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・傾斜角であり、日奈久断層においては横ずれが、布田川断層に対しては正断層のすべりが発生しやすい場となる。これは、平成 28 年熊本地震の前震・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、平成 28 年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。

さらに、平成 28 年熊本地震の一連の地震活動は、地殻の地震波速度構造との特長的な関係を示している。志藤・他 (2016) は Double difference tomography (DD トモグラフィ法) を用いて、震源域の詳細な地震波速度構造を推定した。その結果によると、地震活動は主に周辺より高速度の領域で起こっていることが明らかになった。これは、従来の内陸地震断層における傾向と一致する (たとえば Hori et al., 2006)。また、破壊の開始点の直下においては低速度域であることが示された。このことは、地震のトリガーに流体など、断層強度を弱めるものの存在を示唆する。

このほか、平成 28 年熊本地震の震源断層周辺の詳細な応力場が Matsumoto (2016) の方法により示された。松本・他 (2016) は、熊本地震発生前の地震を用いて推定した応力場から震源断層面上での最大せん断方向を求め、Asano and Iwata (2016) により求められた地震時すべりの分布とほぼ一致することを示した。これは、詳細な応力場と震源断層形状が明らかになっている場合、発生しうるすべり方向を予測できる可能性を示唆している。

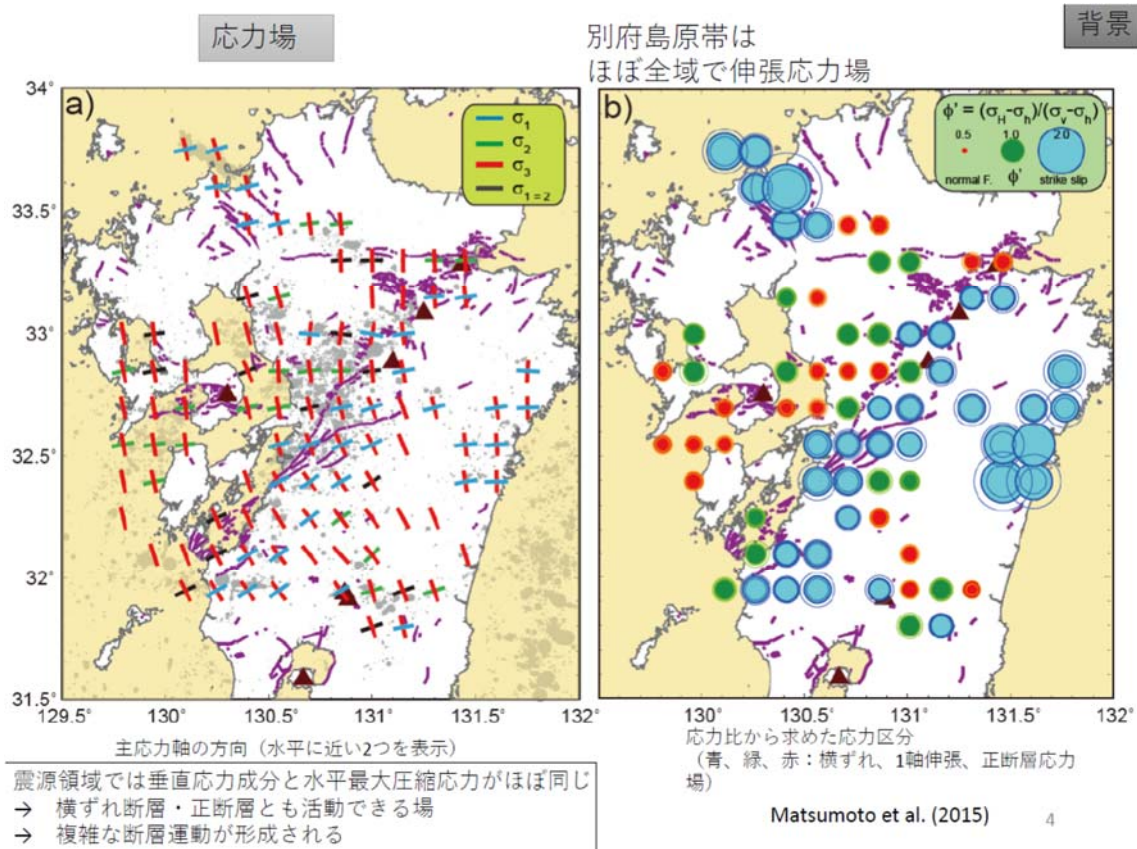


図 1. 九州地域の応力場 (Matsumoto et al., 2015 による)。左図が主圧縮軸方向、右図は応力比を示す。

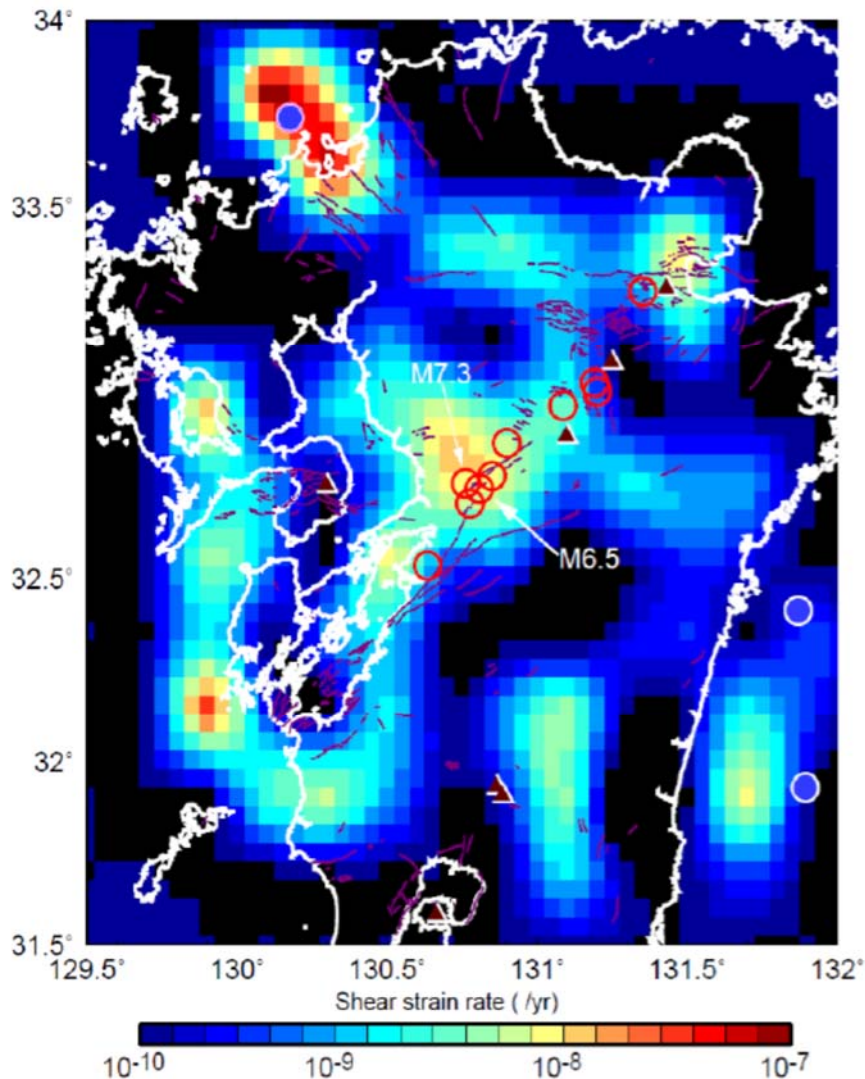


図 2. 九州における地震発生層の地震によって解放された非弾性ひずみ分布 (Matsumoto et al., 2016)。カラースケールは最大せん断ひずみ率を示す。丸は M5.5 以上の地震の震央であり、そのうち赤丸は内陸地震を示す。

2) 当該地域における 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、平成 28 年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、これまで得られた 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 ($M_{JMA}6.1$)、4 月 21 日の大分県西部地震 ($M_{JMA}6.4$) 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., 2007; 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。

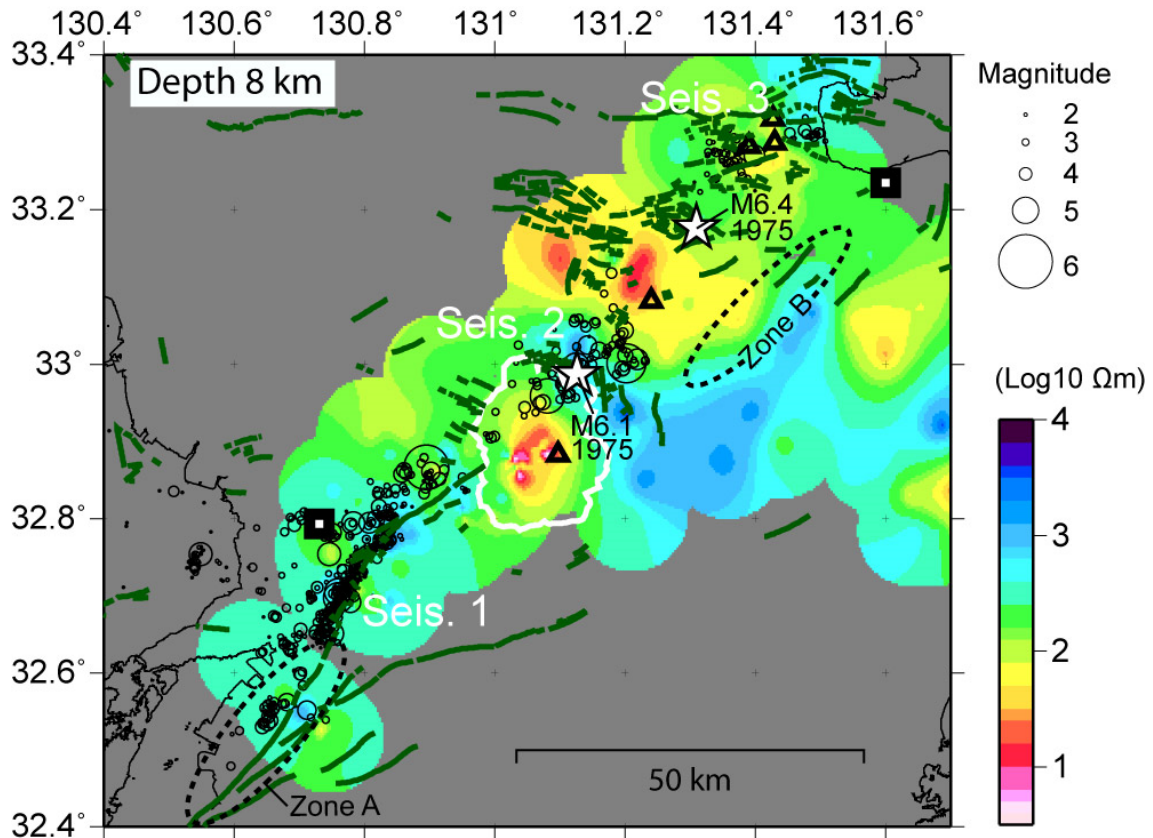


図 3. 1次元解析により推定した比抵抗構造(深さ 8 km)と熊本地震後 1 か月間に発生した地震(黒丸)との関係 (Aizawa et al., 2017 による)。

3) 稠密地震観測と高精度震源決定による平成28年熊本地震の震源断層構造調査

平成28年熊本地震による一連の地震活動について、詳細な断層構造と地表地震断層との関係を明らかにするため、高精度震源決定を行った。解析には、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平成28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(主としてオンライン観測点のみ)をマージした前震発生から約1週間分のデータセットを用いた。活発な余震活動により、非常に多くの地震が発生したため、手動検測に加え自動処理による検測値(自動検測)を用いた。これらの検測値を用いてDouble-difference法による震源決定を行った。相対走時データは通常のカatalog値に基づく値に加え、波形相関解析に基づく値を用いており、地震波速度構造はSaiga et al. (2010)による3次元速度構造を用いている。自動検測によるイベント数は2万個程度あり、手動検測済みのイベントと重複や観測点数が少ないイベントを取り除き、最終的に約13000個のイベントについて再決定を行った。

解析の結果、熊本地震の断層構造の一部が明らかになった(図4)。日奈久断層側は北西側に傾斜した面が明瞭に見られ、地表の断層トレースともおおよそ一致する。一方、布田川断層側では地震活動が低く、明瞭な面は認識できていない。前震・本震の地震時すべり分布(e.g., Asano and Iwata, 2016)を比較すると、地震時に大きくすべった領域では余震があまり発生していないようである。前震・本震の震源(初期破壊点)が位置してい

る布田川断層と日奈久断層のジャンクション領域の深さ断面(図5)を見ると、前震の初動解の南東傾斜の節面や、本震の北北東-南南西走向のほぼ鉛直な節面に対応する地震列が認められ、さらにこれら以外にも複数の面が混在し非常に複雑な構造をしている事が明らかとなった。

これらの稠密地震観測に加えて、サブテーマ2-2と共同でGNSS連続観測を実施するとともに、日奈久断層の日奈久区間に繰り返しGNSS観測の測線を増設した。これらのデータは、サブテーマ2-2で統合解析されてひずみ場の解明に用いられるほか、平成29年度以降繰り返しGNSS観測を継続して日奈久区間の変形の有無やパターンについて調べ、断層モデルの構築に資することをめざす。

緑丸：前震(4/14 Mj6.5)～本震(4/16 Mj7.3)発生直前
青丸：本震発生後～4/21 23:59

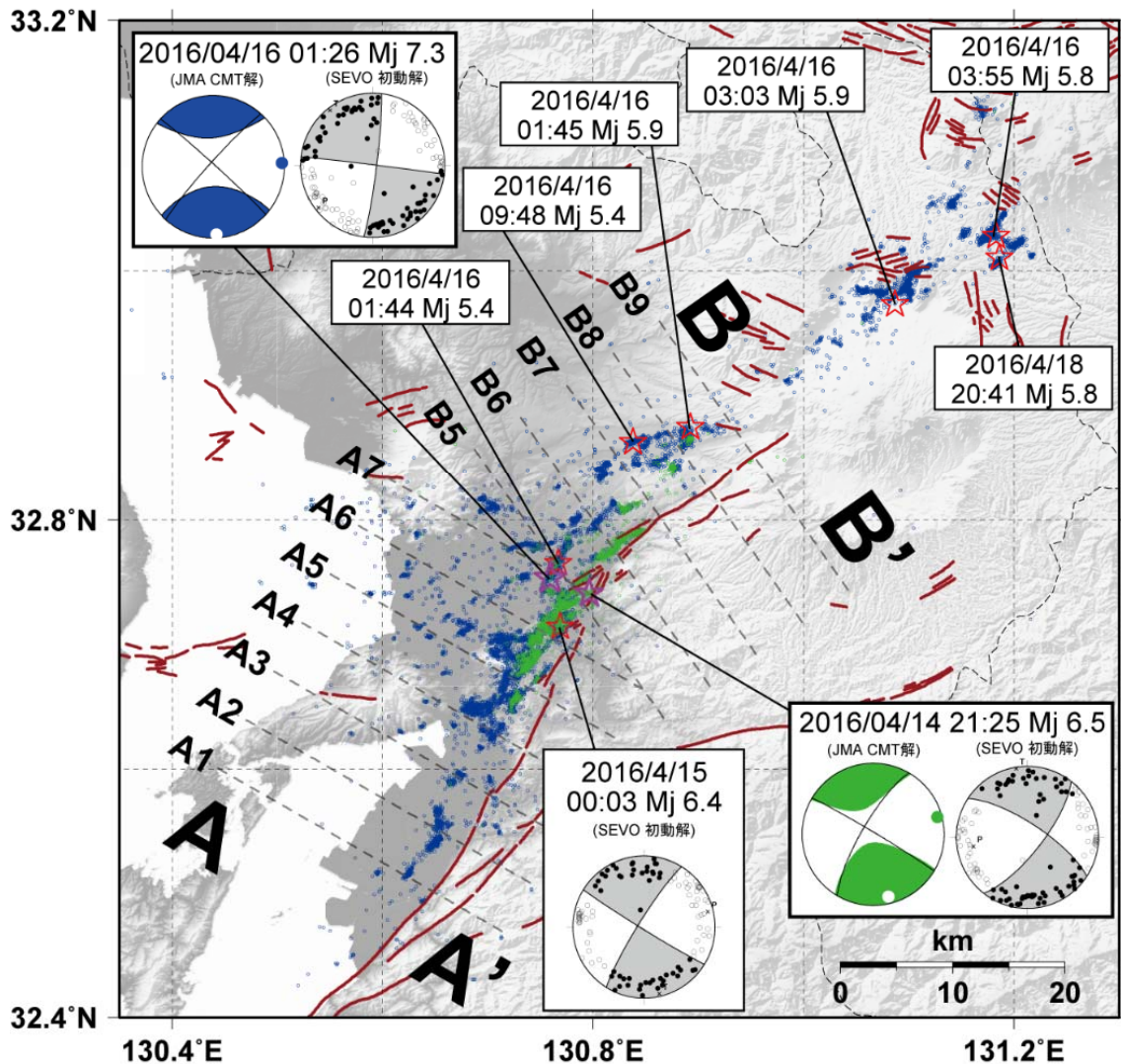
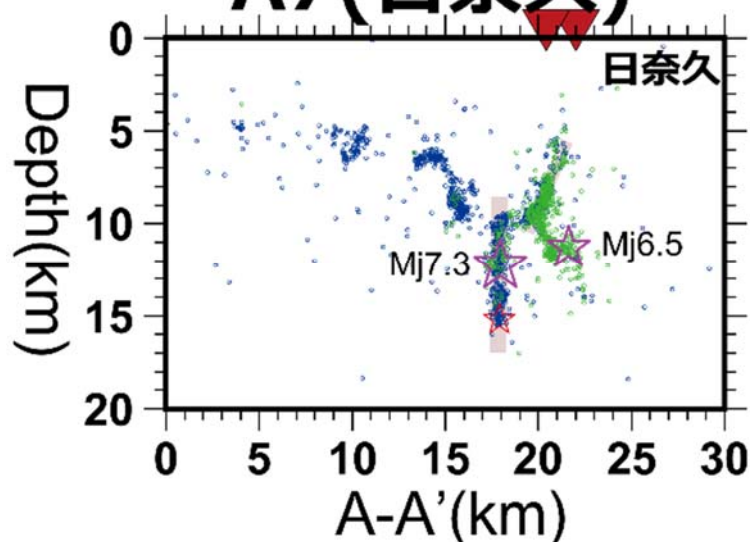


図4. 平成28年熊本地震発生から約1週間の高精度震源再決定結果。星は主な地震の震央を示し、緑の点は4/14の前震から4/16の本震発生前まで、青の点は本震発生後から4/21までの地震を示す。初動発震機構解は九州大学、CMT解は気象庁による。赤の線は活断層を示す(活断層研究会, 1991)。

布田川・日奈久断層 junction部分

A7(日奈久)



B5(布田川)

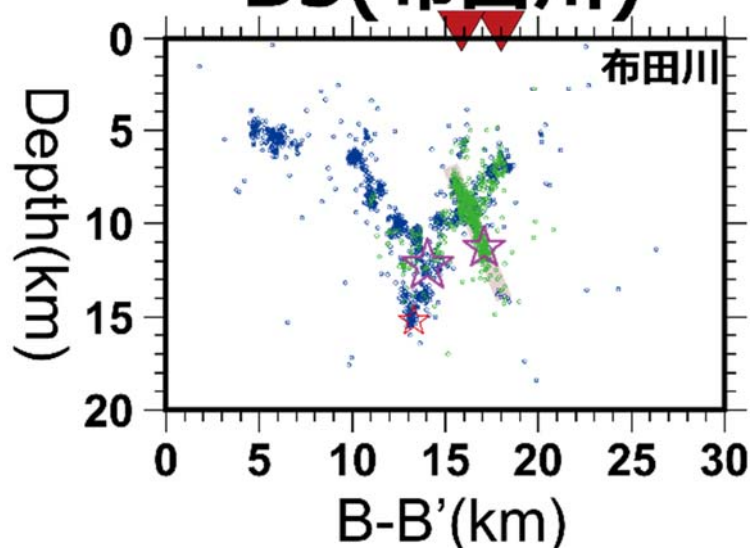


図5. 布田川・日奈久断層のジャンクション領域における深さ断面で、上は日奈久断層の走向、下は布田川断層走向に投影した断面図（断面の位置はそれぞれ図4のA7とB5に対応）。赤逆三角形は地表の活断層トレースの位置を示す。その他は図4と同じである。

4) 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6に調査地域と測線の概略を示す。

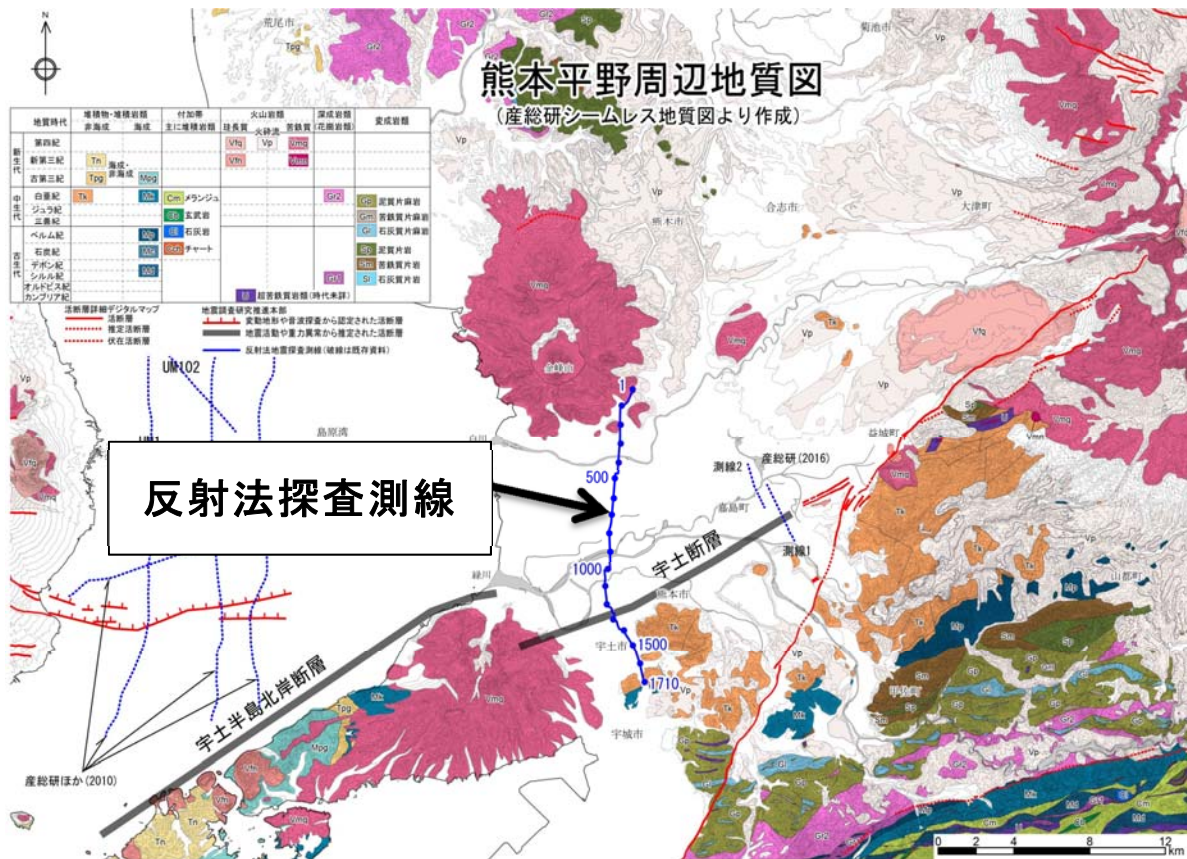


図 6. 反射法地震探査の調査地域と測線位置。

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 17 km であり、標準発震点間隔 10m、標準受振点間隔 20m、展開長約 1.4 km、P 波を用いて、探査深度 1 km 程度をめざした。探査の仕様と使用機器を表 1 と写真 1 に、詳細な測線位置を図 7 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：油圧インパクト（人工震源）
 左下：受振器

項目	内容	備考
探査手法	反射法地震探査	
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
スイープ周波数	10~100Hz	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	2msec	
収録様式	SEG-D	
震源	バイブレーター 1 台 および 油圧インパクト 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

表 1. 反射法地震探査の仕様と使用機器。



図 7. 反射法地震探査の測線位置図。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

ーストップ) を図 8 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 9～図 14 に示す。

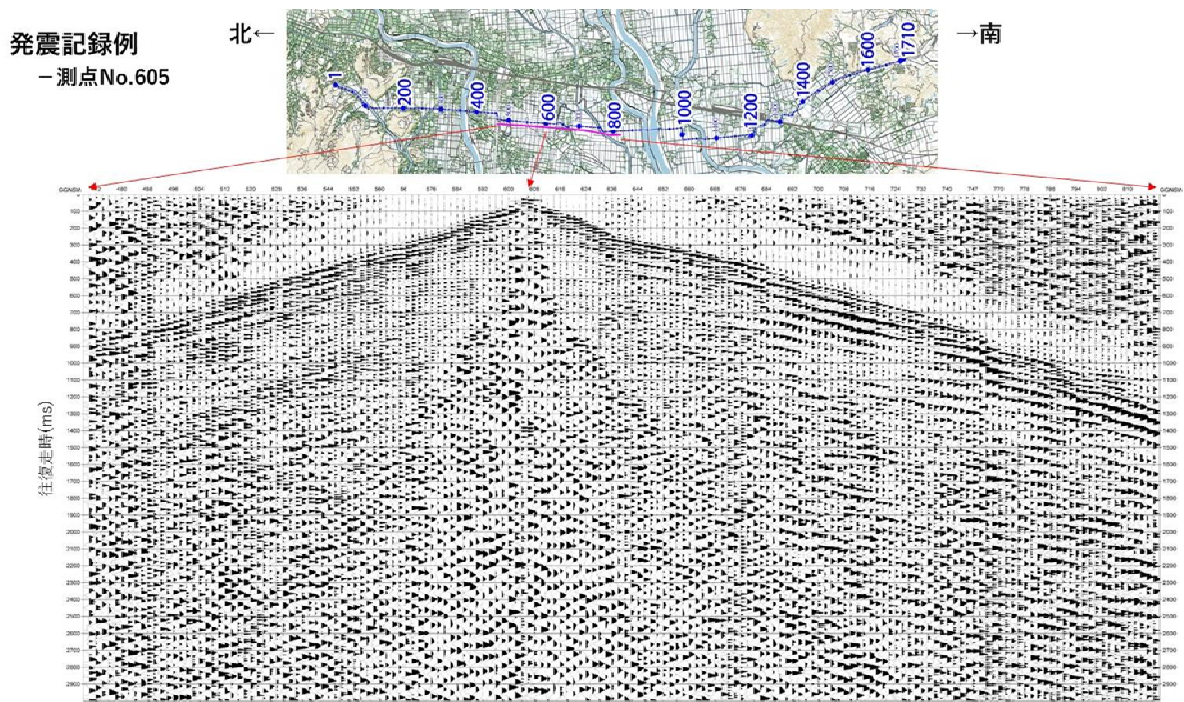


図 8. 測点 No.605 における発震記録。測線の両端まで初動が明瞭に追跡できるほか、反射波などの後続波も認められる。

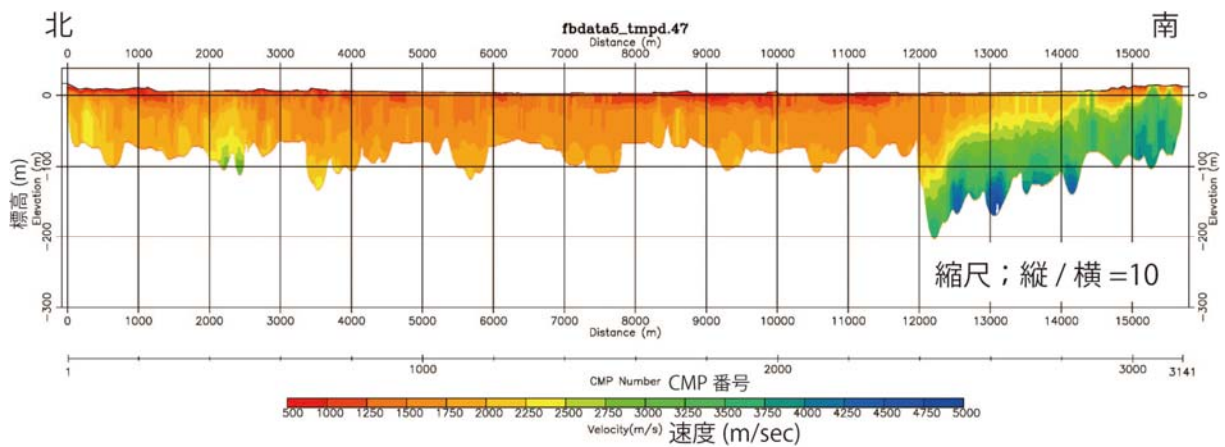


図 9. 表層速度解析結果。

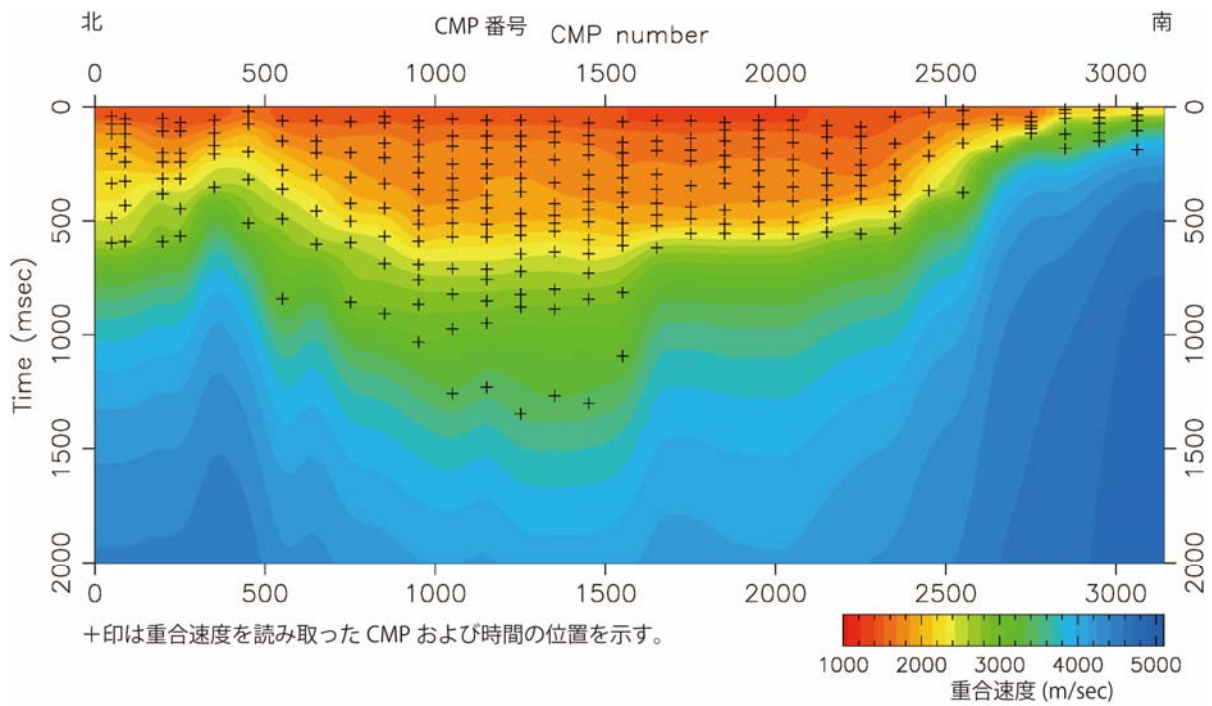


図 10. 重合速度プロファイル。

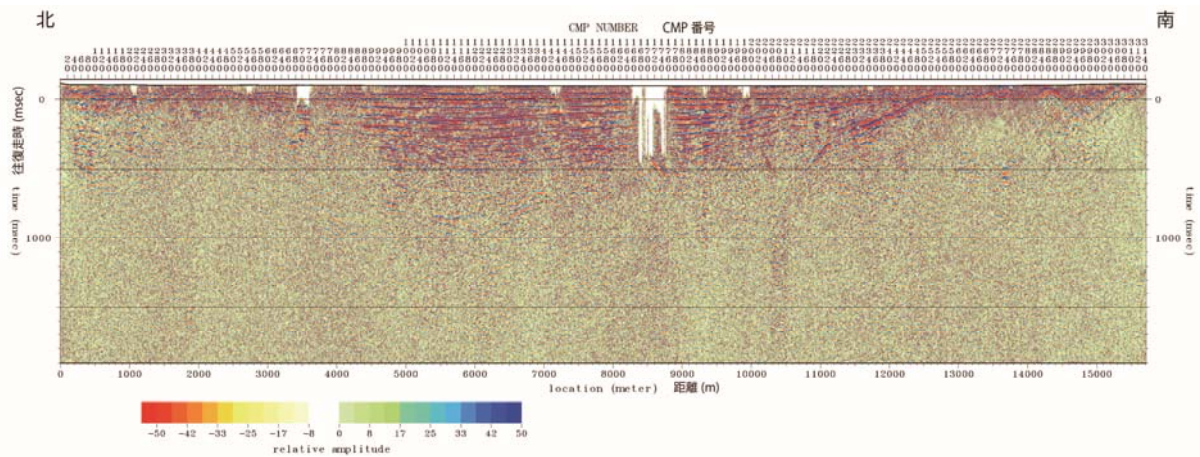


図 11. CMP 重合時間断面図。

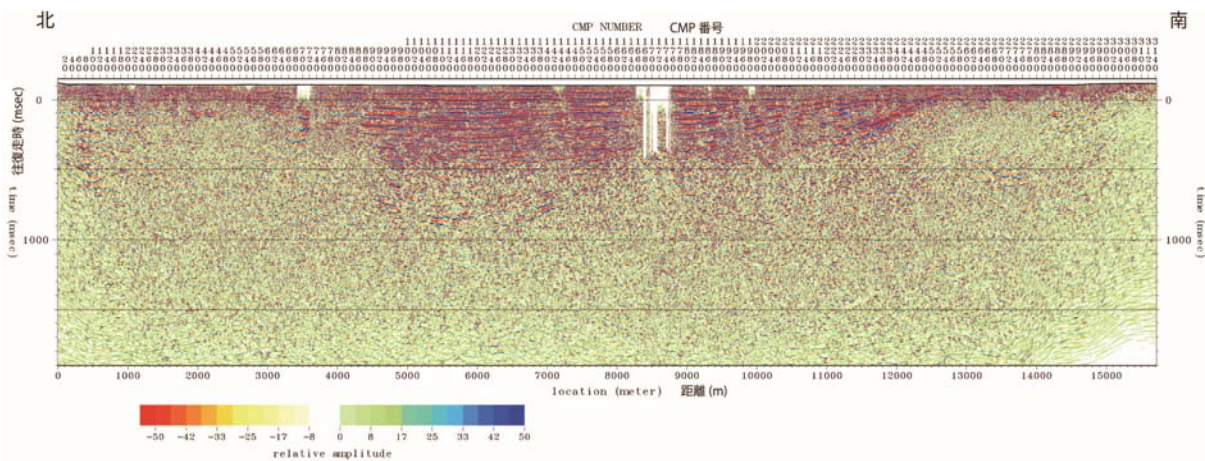


図 12. マイグレーション時間断面図。

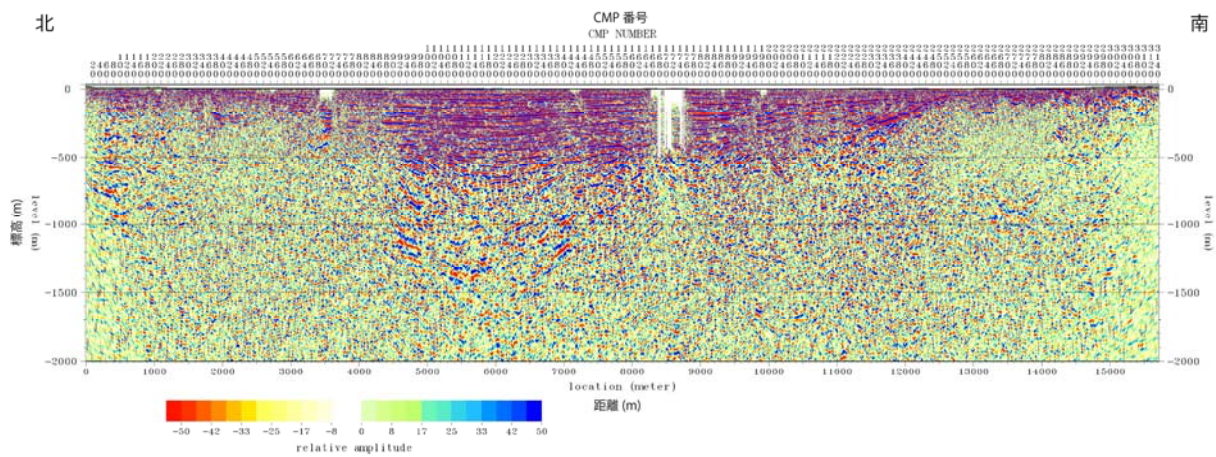


図 13. 深度断面図（縦横比 2:1，カラー表示）。

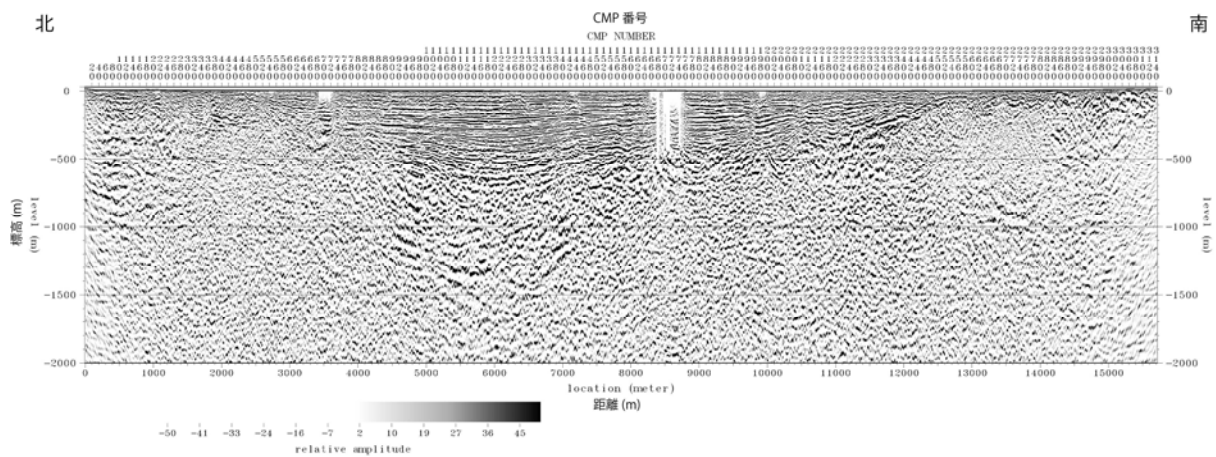


図 14. 深度断面図（縦横比 2:1，グレー表示）。

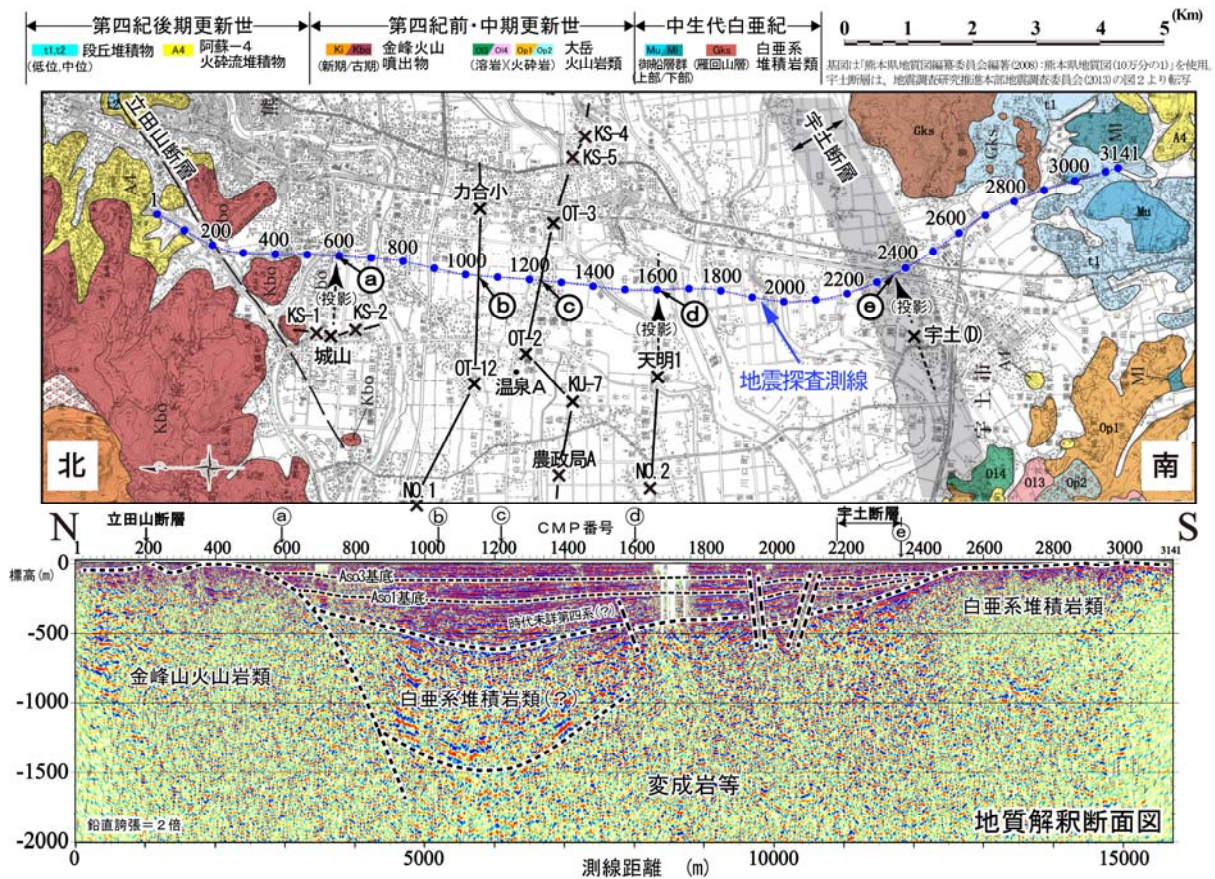


図 15. 深度断面の地質解釈断面図（下段）。上段は、「地質図（熊本県地質図編纂委員会編，2008）」に測線を重ねて表示。

得られた反射深度断面については、今後も検討を続けるが、現時点での解釈（図 15）は以下のとおりである。

【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 15）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 16）、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15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16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、白垂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15)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。ただし、基盤岩上面の変形は明瞭でない。

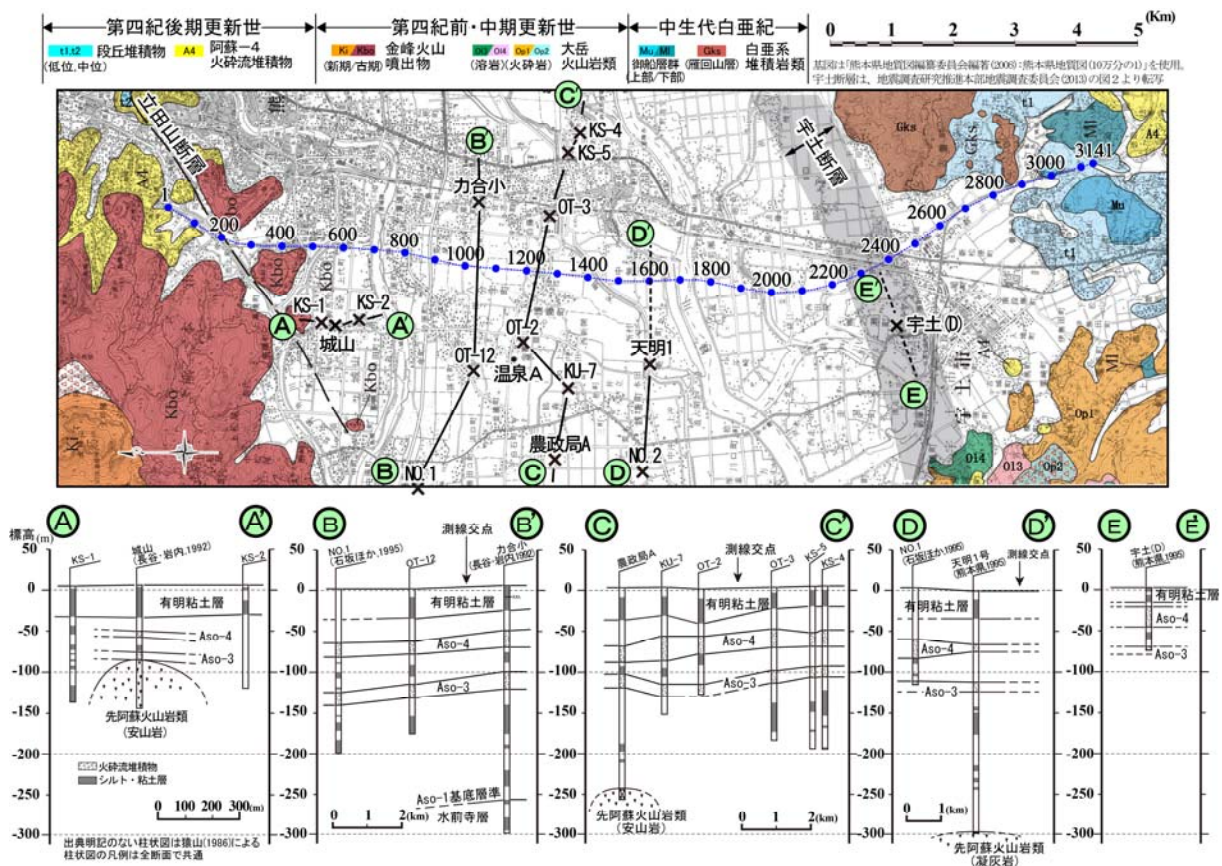


図16. 既存のボーリング資料に基づいた地質柱状断面図(下段)。上段は図15の上段と同図。

(c) 結論ならびに今後の課題

平成28年熊本地震の活動に関して、その地震学的背景についてまとめ、熊本地震の複雑な活動は起震応力場が一軸伸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、主な地震活動は断層面上で地震

波速度が高速度の部分で発生しており、低速度域直上に破壊の開始点が位置しているという、他の内陸地震と共通の特徴が確認できた。地震前の詳細な応力場推定から、地震時の断層面上における複雑なすべり方向を予測することも明らかになった。今後も、応力場と地殻構造の分解能を上げて、地震発生場に関する情報の高精度化を図り、布田川・日奈久断層帯における震源断層モデルの作成に寄与することをめざす。

一方、地震発生ポテンシャルに関しては、平成 28 年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。しかし、布田川断層帯西部の熊本平野や日奈久断層帯周辺では電場や磁場の観測データがほとんどないことから、今後はこれらの地域で MT 探査を実施して比抵抗構造を明らかにし、地震活動や地震学的構造と比較することが必要である。

平成 28 年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、高精度震源決定を行い、断層構造の推定を行った。震源分布から日奈久断層側は北西側に傾斜した面が明瞭にみられたが、布田川断層側では地震活動が低く、明瞭な面は認識できない。前震や本震の震源（初期破壊点）が位置する布田川・日奈久断層のジャンクション領域では、P 波初動による発震機構解の節面におおよそ対応する震源分布の他に、複数の面が混在し非常に複雑な構造をしていることが明らかとなった。今後は、解析期間を過去に遡って、平成 28 年熊本地震に至るまでの地震活動と震源分布を明らかにする。

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宇土区間（宇土断層）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、白亜系の基盤が海拔下約 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、さらに検討が必要である。

本調査における地震観測や反射法地震探査については、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ました。記して感謝いたします。

(d) 引用文献

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.

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.
- Hori, M., et al., Three-dimensional seismic velocity structure as determined by double-difference tomography in and around the focal area of the 2005 west off Fukuoka Prefecture earthquake, *Earth Planets Space*, 58, 1621-1626, 2006.
- 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・岩崎泰穎・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.
- 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)J. 社団法人熊本県地質調査業協会発行, 2008.
- Matsumoto, S., Method for estimating the stress field from seismic moment tensor data based on the flow rule in plasticity theory, *Geophys. Res. Lett.*, 43, doi:10.1002/2016GL070129, 2016.
- 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., 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.
- 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, 2016年熊本地震断層周辺の応力場とその変化, 日本地震学会 2016年秋季大会, S21-03, 2016年10月, 名古屋市.
- 志藤あずさ・松本聡・清水洋・2016年熊本地震合同地震観測グループ, 2016年熊本地震震源域の3次元地震波速度構造, 日本地震学会 2016年秋季大会, S21-P28, 2016年10月, 名古屋市.
- Saiga, A., S. Matsumoto, K. Uehira, T. Matsushima, and H. Shimizu, Velocity structure in the crust beneath the Kyushu area, *Earth, Planets and Space*, 58, 1-12, 2010.
- 猿山光男, 日本の地下水「熊本平野」. 地球社発行, p.749-757, 1986.
- 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.

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 地殻変動調査観測

(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

(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 ヶ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する。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 連続観測を継続する。布田川断層帯・日奈久断層帯全域のひずみ場の推定を行う。

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 28 年度の成果

(a) 業務の要約

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。獅子島の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－白旗区間、日奈久区間の地殻変動を比較するためには獅子島の GNSS

連続観測点でこの地域の地殻変動を把握することは重要である。

GEONET、九州大学・京都大学・鹿児島大学が共同で設置している GNSS 観測点で観測された地震時変動を使って震源断層の形状を推定し、地震時変動は主に布田川断層帯の震源断層により引き起こされたことがわかった。

国立大学法人が行っている余効変動観測から、日奈久断層帯南西の観測点で最大約 8 ヶ月で約 11cm 変位した余効変動が観測されていることがわかった。この変動は 1 年近く経過した現在も継続していることが明らかになった。

(b) 業務の成果

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ある獅子島小中学校の屋上に GNSS 連続観測点を設置し、3 月 10 日に観測を開始した。観測点配置図を図 1 に示す。

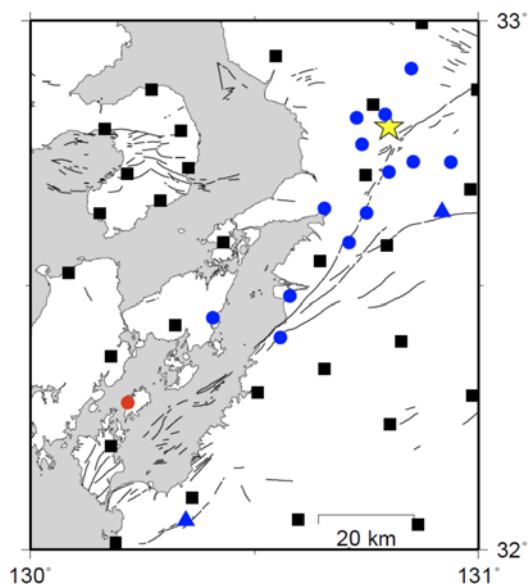


図 1. 平成 28 年度に新たに設置した GNSS 連続観測点の位置（赤丸）。黒四角は国土地理院の GEONET、青三角は、九州大学・京都大学・鹿児島大学が設置した GNSS 連続観測点、青丸は平成 28 年熊本地震発生後に設置された GNSS 連続観測点を示す。黄色星印は 4 月 16 日に発生した M7.3 の地震の気象庁が決定した震央の位置を示す。

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 2 に GNSS 観測点の写真を示す。



図2. 新設した GNSS 観測点の写真。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。

4月16日に発生したマグニチュード(M)7.3の地震の地震時変動を布田川断層帯・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、4月15日に宇城市豊野小中学校に設置した GNSS 観測点および気象庁が火山に展開している 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。RTKLIB は相対測位で kinematic 解析を行うため、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3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)の平均の差として計算した。豊野観測点(TYNO)では東西方向の地震時変動では変位の標準偏差とほぼ同程度の変位し、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4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 観測点熊本の74.7cmであった。4月15日に設置した宇城市豊野小中学校の観測点では21.8cmであった。

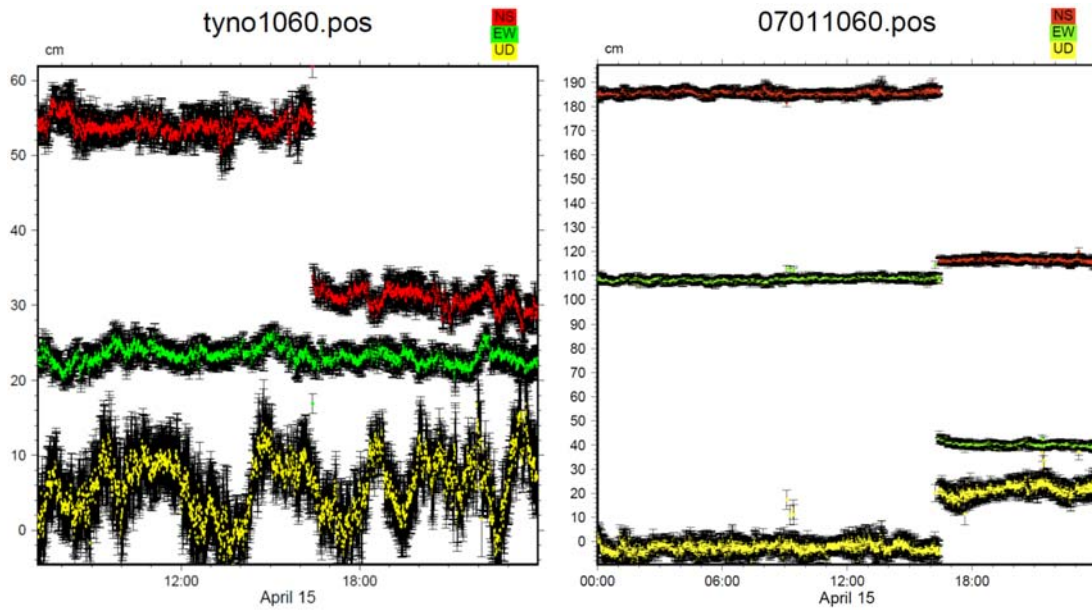


図3. 左は宇城市豊野小中学校 (TYNO)、右は GEONET 長陽観測点 (960701) のキネマティック解析結果を示す。赤は南北、緑は東西、黄は上下の各成分を示す。

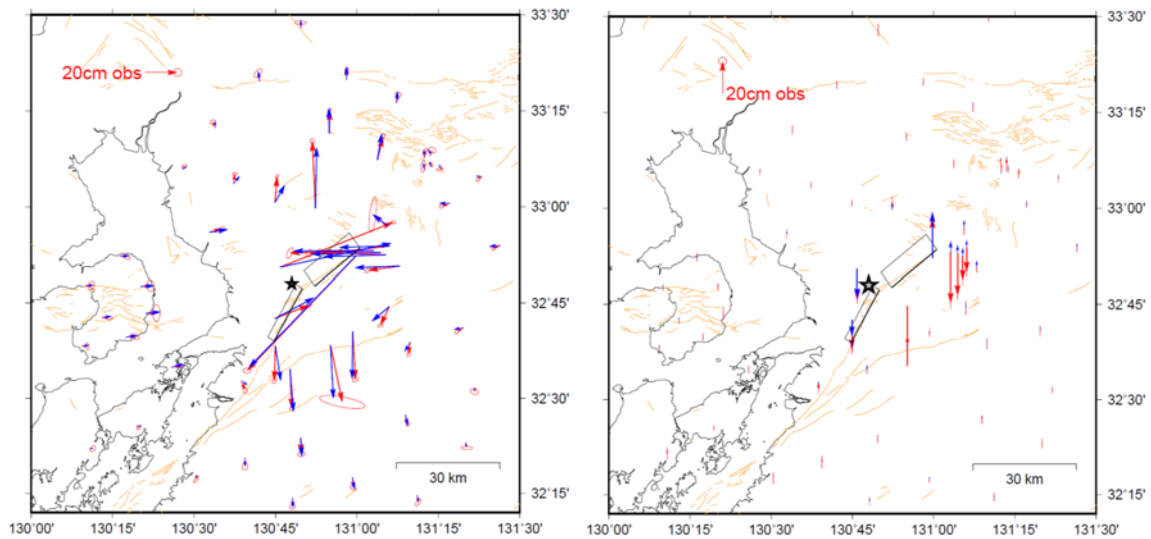


図4. 地震時変動のベクトル図。(左) 水平成分、(右) 上下成分、赤いベクトルは観測値を、青いベクトルは推定した断層モデルから計算した理論値を示す。オレンジ線は活断層 (活断層研究会、1991) を示す。四角は推定された震源断層を地表に投影されたものを示し、太線が断層の浅部を示す。星印は4月16日に発生したM7.3の地震の気象庁が決定した震央を示す。

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タを表1に示す。布田川断層帯・日奈久断層

帯に仮定した震源断層とも主には右横ずれの変位であるが、布田川断層帯では正断層成分が、日奈久断層帯では逆断層成分があることが推定された。また、滑り量は布田川断層帯に仮定した震源断層が 4.3m と日奈久断層帯に仮定した震源断層の 1.0m 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。

表 1. 推定された断層形状パラメタ

	深さ (km)	右横滑り量 (m)	逆断層滑り量 (m)	幅 (km)	傾き (度)
布田川断層帯	0.2	4.167	-1.195	13	64
日奈久断層帯	1.0	0.978	0.173	28.3	85

平成 28 年熊本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、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 5)。参加国立大学法人は、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。ここでは、平成 28 年熊本地震発生直後に設置された GNSS 観測点と発生前から設置されていた 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 観測点で観測された余効変動の情報を収集した結果を説明する。

図 6、図 7 に余効変動の時系列データを示す。日奈久断層帯南東側の観測点では非常に大きな余効変動が観測され、平成 28 年熊本地震発生後 1 年近く経過した段階でも以前余効変動が継続しているように見える。特に震央に近い御船町立御船小学校 (MIFN) 観測点は南北成分において約 8 ヶ月で約 11cm の変動を観測している。日奈久断層帯の北西側の観測点では、南東側の観測点ほど長期で大きな余効変動は観測されていない。2017 年 1 月 29 日より GNSS で使用する座標系が ITRF2008 から ITRF2014 に変更された。2017 年 1 月の下旬にみられるステップや前後の変動率の違いは座標系の変更による見かけの変化の可能性があるのであるため、注意が必要である。今後解析を ITRF2014 座標系で行うように解析手順を変更する必要がある。

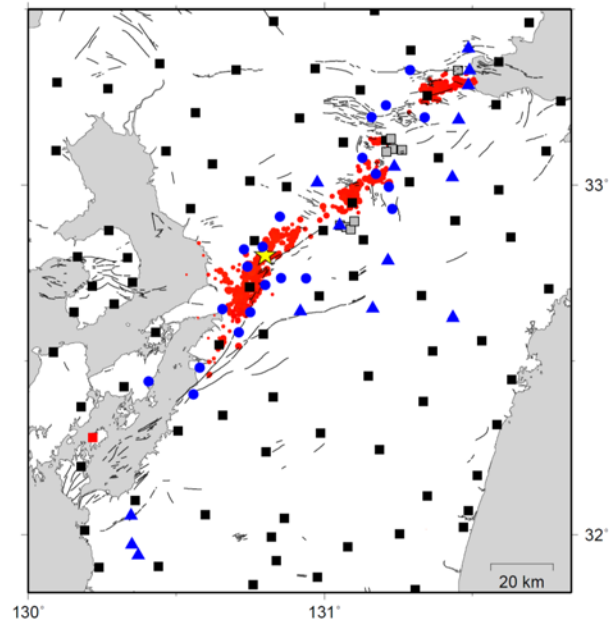


図5. 九州中央部のGNSS連続観測点配置図。黒四角は国土地理院のGEONET、青三角は、九州大学・京都大学・鹿児島大学が設置したGNSS連続観測点、灰四角は気象庁の火山監視用GNSS連続観測点、青丸は平成28年熊本地震発生後に設置されたGNSS連続観測点、赤四角は本事業で設置したGNSS連続観測点を示す。黄色星印は4月16日に発生したM7.3の地震の気象庁が決定した震央の位置を示す。赤丸は気象庁一元化震源の震央分布である。

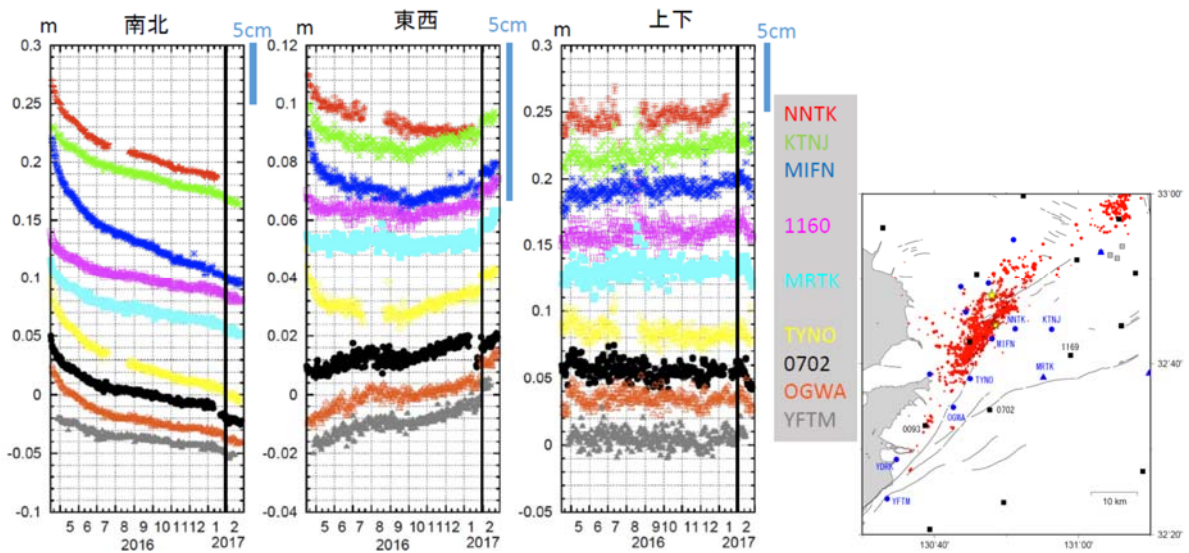


図 6. 日奈久断層帯南東側の GNSS 観測点で観測された余効変動 (2016 年 4 月 17 日～2017 年 2 月 28 日)。左から南北成分、東西成分、上下成分の変化を示し、色は観測点を示す。観測点の位置を一番右側の図に示す。黒縦線は 2017 年 1 月 29 日の座標系変更を示す。

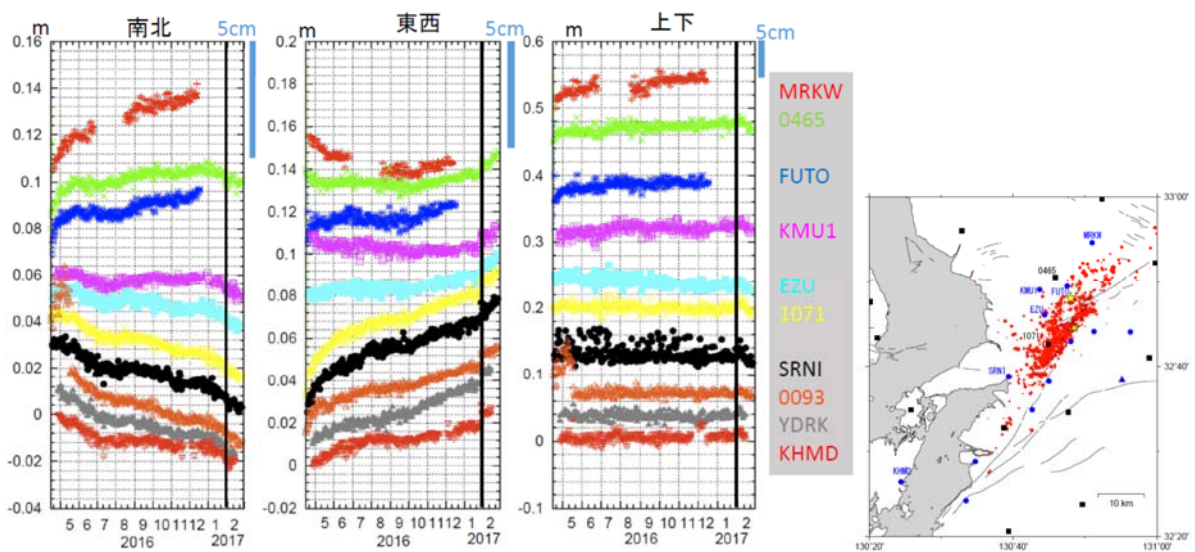


図 7. 日奈久断層帯北西側の GNSS 観測点で観測された余効変動 (2016 年 4 月 17 日～2017 年 2 月 28 日)。左から南北成分、東西成分、上下成分の変化を示し、色は観測点を示す。観測点の位置を一番右側の図に示す。黒縦線は 2017 年 1 月 29 日の座標系変更を示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

日奈久断層帯南部（八代区間）の地殻変動を観測するため新たにGNSS連続観測点を設置し、観測を解析した。今後も観測を継続し、地殻変動の特徴を明らかにしていく。

地震時変動を、キネマティック解析を行い推定した。これにより余効変動が混入しない地震時変動を推定することができた。地震時変動を説明する震源断層の形状や断層変位を布田川断層帯・日奈久断層帯にそれぞれ1枚の矩形断層を仮定して求めたところ、日奈久断層帯よりも布田川断層帯の断層変位が大きく推定され、地震時変動は布田川断層帯の震源断層により引き起こされたことがわかった。

国立大学法人のGNSSグループが行っている余効変動観測の情報を収集した。日奈久断層帯の南西側にある観測点では平成28年熊本地震発生後1年近く経た現在も継続し、変位量も大きな余効変動が観測されていることがわかった。一方日奈久断層帯北西側の観測点では、南西側に比べて変位量も小さく、継続期間の短い。今後は余効変動の長期観測を行い、余効変動の時間的空間的な特徴を明らかにし、その変動源について検討する。

(d) 引用文献

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.

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.