

令和 3 年 6 月 2 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2020

課題番号：17H02952

研究課題名（和文）地震発生帯の上限の謎に迫る

研究課題名（英文）Toward elucidation of behavior in updip limit of seismogenic zone

研究代表者

加藤 愛太郎 (Kato, Aitaro)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：20359201

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：地震発生帯の上限で起きている地震活動の詳細を調べるために、2016年熊本地震が発生した布田川断層帯を中心に超高密度な地震観測網を設置して約50日間の地震波形データを取得した。データを解析した結果、布田川断層帯の傾斜方向と整合的な北西方向に高角度で傾斜する震源分布が得られた。また、断層帯直下の深さ2 km以浅の地表付近において、顕著な地震活動は起きていないことも分かった。さらに、浅い地震のマグニチュードが深いものに比べて小さくなる特徴が見られ、摩擦特性の深さ方向の遷移を反映している可能性が考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

2016年熊本地震を引き起こした布田川断層帯の直上における観測により、地表地震断層から深さ約2 kmまで顕著な地震活動が起きていないこと、地表に近い地震ほど規模が相対的に小さくなることを示した。これらは、地震発生帯の上限付近において地表に向かって断層の摩擦特性が徐々に変化することを示唆する。一方で、熊本地震発生時のすべりは断層深部から地表まで到達しており、摩擦特性の変化はそれほど強いものではなく、勢いのある加速した動的破壊すべりが伝わってくる場合には、地震性すべりが起きることを意味する。

研究成果の概要（英文）：We deployed a very dense seismic array near the surface traces of Futagawa active fault, which hosted the 2016 Kumamoto earthquake in Kyushu, to investigate the detailed distribution of earthquakes around the upper limit of the seismogenic zone. After analyzing the continuous seismic waveform data during about 50 days, we revealed that hypocenters roughly aligned along a NW-dipping plane, which is consistent with the inclination of the Futagawa fault and the aftershock distribution of the Kumamoto earthquake. We have not detected any earthquakes at depths shallower than about 2 km beneath the fault surface traces. The magnitude of earthquakes at shallow depths is smaller than that at deep earthquakes, indicating a transition of frictional property along the fault-dip.

研究分野：地震学

キーワード：地震発生帯の上限 地震活動 超高密度地震観測

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震(マグニチュード(M)約6以下)が発生する深さには、上限と下限が存在することが古くから知られており、地震が発生する領域は「地震発生帯」と呼ばれている。地震発生帯の下限の深さは、温度構造に主に支配されていると考えられている。例えば、日本列島の内陸部における地震発生帯の下限の深さは、地殻熱流量の測定データと熱伝導モデルから予想される温度350~400度の等温線に概ね沿って分布する。これは、温度が高温になると岩石の延性変形が脆性変形に比べて卓越してくるため、脆性的な滑りが起きづらくなり地震の発生が抑制されるからである(e.g., Blanpied et al., 1995, Kato et al., 2003)。一方で、地震発生帯の上限の深さを規定するメカニズムに関しては、室内実験の知見に基づき、法線応力の減少による地震発生ポテンシャルの低下や、粘土鉱物の存在による不安定滑りの抑制などの説が提唱されている(e.g., Scholz, 1998)。しかしながら、天然の断層帯浅部において進行する滑り様式や変形過程に関しては良く分かっておらず、地震発生帯の上限が存在する理由は謎として残っている。

2. 研究の目的

地震が自ら発生する領域の深さには上限があることが良く知られているが、なぜ地震発生帯の上限が存在するのかは未解明の謎である。断層浅部における滑り挙動を明らかにするためには、時間と空間方向の分解能が最も高い情報を有する地震活動を検出することが謎を解き明かす上で布石となる。そこで、本研究計画では、世界でも類をみない超高密度地震観測網を内陸地震(2016年熊本地震)の震源域に出現した地表断層近傍に展開し、取得される連続波形データを様々なイベント検出手法を用いて解析することで、断層浅部における地震活動の詳細を明らかにする。そして、断層浅部で進行する滑り様式や変形過程に関する新たな知見を得ることを目指す。

3. 研究の方法

本研究では、2016年熊本地震が発生した活断層の一つである布田川断層帯を中心に、約1000点から構成される超高密度な地震観測網を設置して、2017年12月17日~2018年2月6日の約50日間にわたり連続波形データを取得した(図1)。具体的には、熊本県上益城郡益城町及び阿蘇郡西原村に至る約7km×約5kmの範囲内に、布田川断層の地表トレースが観察された地点を中心に、約1000点の地震計を22個のアレイ形状に分割して配置した(図1内の△印)。各アレイは、35~55個の地震計から構成され、各地震計の設置間隔は約30~60mと高密度に配置した。各観測点には、短周期地震計、データ収録装置とバッテリーから構成される独立型地震観測システム(Geospace Technologies社製のGSXシリーズ)を設置し、サンプリング周波数250Hzで連続波形データを収録した。観測終了後に、回収した独立型地震観測装置から専用のデータ回収システムを用いて、観測データの転送作業を実施した。そして、収集したデータを1分間毎のSEGDフォーマット及びWINフォーマットに変換した。WINフォーマットに関しては、各観測点の波形データを統合し、一つの波形ファイルとして1分間毎に作成した。

波形データの統合化処理の確認やノイズレベル等の品質チェックを実施した。その後、信号対ノイズ比の比較的高い観測点の連続波形データを主に使用して、従来型の自動震源処理を施し、観測網の直下で発生した微小地震を検出し、震源決定をおこなった。次に、全観測点を22個の小アレイに分割し、それぞれのアレイに対してセンブル解析を実施することで、コヒーレントな波

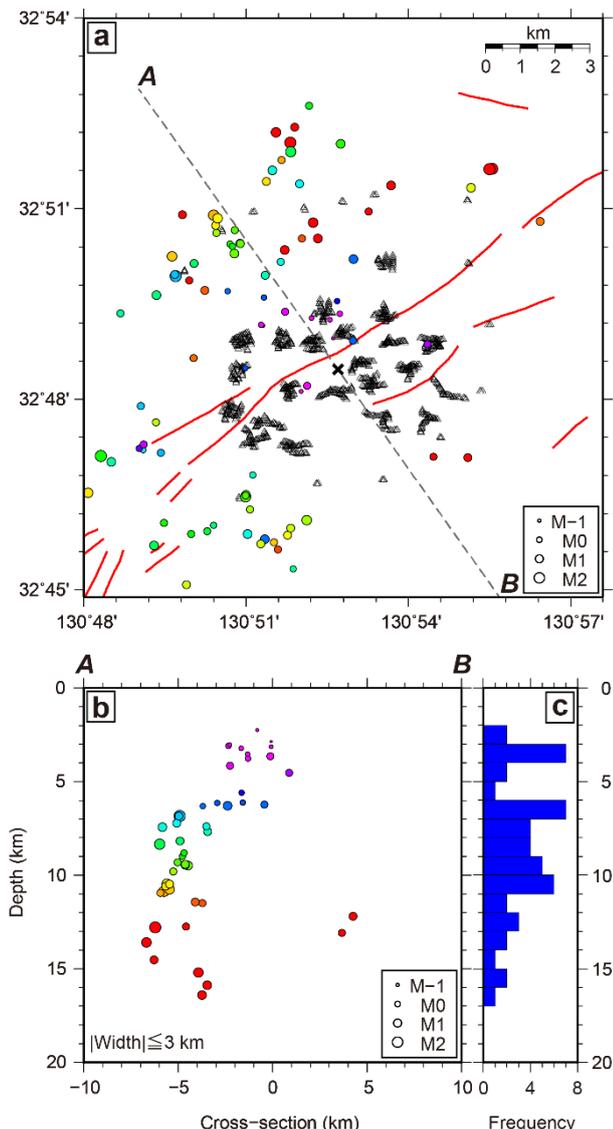


図1. 超高密度地震観測網と検出された震源分布。(a)△印は設置した地震計の位置、○印は震央分布で、色は深さ、大きさはマグニチュードを表す。赤線は活断層の地表トレースに対応。(b)波線A-Bに沿う震源分布の深さ断面図(±3 km)。(c)地震の深さ頻度分布。

群の到来方向と入射角の推定を試みた。各小アレイの波群の検知能力を調べるために、やや遠地の信号対雑音比の高い地震波形を用いてセンブル解析をおこない、波群の到来方向・入射角の推定結果が良好であることを確認した。また、各小アレイに含まれる観測点の連続波形データを用いて、隣り合う観測点間の畳込みを計算することで、小さな地震から放射された微弱なP波の到達を検出することにも成功した。信号対雑音比の低い波群の到達時刻の検出に有効な手段となる可能性が考えられる。

検出された地震波形データと、稠密観測網周辺の基盤的地震観測網のデータを統合することで震源の深さの決定精度の向上を試みた。さらに、検出された微小地震を対象に、相対走時差法に基づく震源再決定法を適用し、断層周辺で発生した計90個の地震の震源を決定した。

4. 研究成果

断層近傍に再決定された震源分布を見てみると、観測網直下では、北西方向に高角度で傾斜する震源分布が得られた。この震源分布は布田川断層帯の傾斜方向と整合的であり、これらの活動が布田川断層帯に関連したものであることが考えられる。また、観測網直下の深さ2 km以浅の地表付近においては、顕著な地震活動は起きていないことも分かった。最も浅い地震の深さは約2 kmであり、マグニチュードも-1以下と微小な地震である。図2に、最も浅い地震と深い地震の波形トレースを震央距離の順番（等間隔）に並べて示す。図2より、最も浅い地震はP波の見かけ速度が深い地震に比べて遅く（傾きが緩い）、S波とP波の到達時間差も短いことが分かり、震源の深さの違いが波形データの特徴の違いとして明瞭に示された。

図1より、深さが約3 kmよりも浅い地震のマグニチュードが、深い地震に比べて小さな値を示す特徴が見られる。地震発生帯の上限付近では、深部に比べてマグニチュードが小さくなることを意味しており、断層帯の摩擦特性の深さ依存性やせん断すべり過程のスケール則を考える上で重要な知見である。

観測網内で発生した気象庁一元化処理震源リストに掲載されている地震の上限と比べて、本研究の結果は深さが3 km程浅くなる。これは、震源域の直上に稠密観測網を設置することで、震源の深さがより正確に決定されたことが要因と考えられる。

深さ2 km以浅の地表付近において顕著な地震活動は起きていないという特徴は、益城町から西原村にかけて行った稠密地震観測データに基づく地震波トモグラフィ解析結果（Kato, 2017, Workshop on Frontiers in Studies of Earthquakes and Faults）とも調和的である。布田川断層帯の北側には、地表から深さ約2 kmまで低速度層がイメージングされており、その低速度層内での地震活動はほぼ見られない。布田川断層帯の南側には、地表から深さ約2 kmまで高速度層が存在しているが、こちらにも顕著な地震活動は起きていない。布田川断層帯は、北側の低速度層と南側の高速度層との境界付近に概ね位置しており、微小地震の活動域の上限は地下構造の水平方向の不均質性に、あまり影響を受けていないと推察される。また、本研究の超稠密地震観測網直下で捉えられた浅い地震のマグニチュードは、-1以下のものも含まれ基盤的地震観測網のデータからは検知できない極微小地震である。これらは、北西方向に全体的に傾斜する本震の断層面の最上部に位置しており、熊本地震に伴う余震活動の一部として布田川断層帯のすべりを表していると考えられる。深さが約3 kmよりも浅い地震のマグニチュードが深い地震に比べて小さな値を示す特徴は、浅い領域において、断層すべりの摩擦特性が地表に向かってより安定的な性質へと徐々に遷移していることを示唆する。しかしながら、地震発生帯上限と地表の間のすべり・変形特性については未解明であり、本研究で得られた成果に基づいて断層近傍における稠密な地殻変動観測・解析などを実施することで、断層帯浅部におけるすべり・変形特性についてより広帯域且つ多角的視点で研究を進めていくことが重要である。

<引用文献>

- ① Blanpied, M. L., D. A. Lockner, and J. D. Byerlee, Frictional slip of granite at hydrothermal conditions, *J. Geophys. Res.*, 100, 13,045–13,064, 1995.
- ② Kato, A., M. Ohnaka, and H. Mochizuki, Constitutive properties for the shear failure of intact granite in seismogenic environments, *J. Geophys. Res.*, 108(B1), 2060, doi:10.1029/2001JB000791, 2003.
- ③ Scholz, C. H., Earthquakes and friction laws, *Nature*, 391, 37–42, doi:10.1038/34097, 1998.

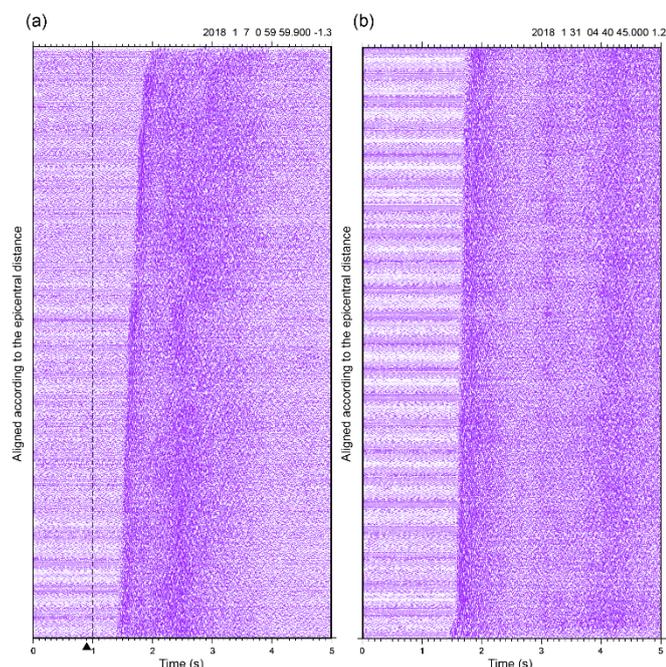


図2. 超高密度地震観測網で記録された浅い地震(左, M-1.3)と深い地震(右, M1.2)の波形トレース。浅い地震の▲印は発震時に対応。破線は参考線。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hayashida, Y. S. Matsumoto, Y. Iio, S. Sakai and A. Kato	4. 巻 47
2. 論文標題 Non-double-couple micro-earthquakes in the focal area of the 2000 Western Tottori earthquake (M 7.3) via hyperdense seismic observations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Geophys. Res. Lett.	6. 最初と最後の頁 e2019GL084
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2019GL084841	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kato Aitaro, Sakai Shin'ichi, Matsumoto Satoshi, Iio Yoshihisa	4. 巻 2
2. 論文標題 Conjugate faulting and structural complexity on the young fault system associated with the 2000 Tottori earthquake	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Communications Earth & Environment	6. 最初と最後の頁 13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s43247-020-00086-3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Kato Aitaro
2. 発表標題 Slip towards the surface new insights from recent crustal earthquakes in Japan
3. 学会等名 Workshop on Frontiers in Studies of Earthquakes and Faults（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 地震解析装置及び地震解析プログラム	発明者 堀内茂木, 佐藤優子, 加藤愛太郎, 東中基 倫	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、6778921	取得年 2020年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	西田 究 (Nishida Kiwamu) (10345176)	東京大学・地震研究所・准教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関