7. 平成 28 年(2016 年) 熊本地震(2016 年 4 月 14 日, M6.5; 4 月 16 日, M7.3)

1. はじめに

平成 28 年 (2016 年) 4 月 14 日 21 時 26 分, 熊本市東 部の深さ 11km を震源とする M6.5 の地震が発生し, 熊 本県上益城郡益城町で震度7のゆれを記録した.その後, この地震の余震活動は布田川断層と日奈久断層の合流点 (屈曲部)あたりで活発化し、約3時間後の4月15日0 時3分のM6.4の地震に続き、約28時間後の4月16日 1時25分にM7.3の本震が発生した. この本震では,益 城町で再び震度7,西原村でも震度7,熊本市と南阿蘇 村で震度6強を観測し、広範囲で建物の倒壊等の甚大な 被害が発生した(図1).短時間に同一地点で震度7が 2回記録されたのは観測史上初めてであった。防災科学 技術研究所の KiK-net 益城 (KMMH16) では, 前震で 1580gal, 本震で 1362gal を記録した¹⁾. 人的被害は, 死 者 273 名(間接死も含む),負傷者 2809 名,住宅被害は 全壊 8667 棟, 半壊・一部損壊 198,219 棟, 火災 15 件に 上る²⁾.

4月14日のM6.5を16日M7.3の前駆的活動としての 前震とみるか,後者が前者の余震の1つとみるかは見解



図1 (a) 4月14日M6.5(前震)の震度分布と (b) 4月16日M7.3(本震)の震度分布.

遠田 晋次(東北大学災害科学国際研究所)

が分かれるところである. M6.5 を「前本震」, M7.3 を「後 本震」などと称する場合もあるが、メカニズムは別とし て、ここでは紛らわしさをさけるため、前者を「前震」、 後者を「本震」と呼ぶことにする.

2. 地震活動の推移

2.1 前震活動

前震(M6.5)のメカニズム解は,東西に最大圧縮軸 をもつ横ずれ断層である³⁾.M6.5 直後の余震群がほぼ 日奈久断層帯北部と重なるように分布することから,日 奈久断層帯と整合的な北東走向の右横ずれ断層と推定 される.約3時間後のM6.4を含め,この地震の余震活 動は活発で,この間のb値は0.5-0.8 程度の顕著に低い 値を示した⁴⁾(ただし本震直前に上昇).

Kato et al. (2016)⁵⁾は一連の地震活動の時空間発展を 分析し,前震以降に地震活動域(M6.5の余震域)が震 源断層の走向方向と傾斜方向に拡大したことを示した. さらに,ゆっくりすべりとも連動することによって,本 震断層面へのクーロン応力が増大することで本震発生が 促されたと推定した.

一連の地震活動と既知の活断層との関係を明らかにす るため、清水ほか(2019)⁶⁰は詳細な地震波速度構造に 基づいて震源再決定を行った.その結果、前震(M6.5) は日奈久断層本体ではなく、隣接する高角東傾斜の断層 であるとした.また、本震の破壊開始点も東傾斜の断層 が関係したとし、震源断層分布や破壊プロセスの複雑さ を示した.

2.2 本震一余震活動

本震に伴う余震活動については、震源断層沿いだけで はなく、北東へは阿蘇市周辺や大分県由布市や別府市 周辺、南西へは八代市にまで、広範囲で活発化した.特 に、本震から32秒後に由布市で発生した M5.7の地震 は、別府市などに震度6強のゆれをもたらした(当初は 本震によるものとされていた).この地震は本震の地震 波通過に伴う動的応力変化による誘発作用で説明されて いる⁷⁾.続いて、4月16日午前3時3分と3時55分に は阿蘇市で M5.9(最大震度5強)と M5.8(最大震度6 強)などの余震も発生した.由布一別府の活動を別とし ても、北東一南西に約100km長にわたり余震活動が広 がった(図2b).震源断層長の2倍を超える.余震のメ カニズム解は東西方向の圧縮軸を持つ横ずれ断層と東 西走向の正断層を主とし、熊本地震前に推定されていた 応力場⁸と整合する. 広域の余震活動は、両震源断層端を超えて広がるだけ ではなく、熊本市直下から島原湾にかけて東西に帯状に も広がる.これらの余震のメカニズム解は概ね東西走向 の正断層で、雲仙地溝帯の構造とも整合的である.2016 年8月31日には、この余震域で宇城市と熊本市で最大 震度5弱を記録する M5.2の地震が発生した.これらの 余震の広がりは、本震による静的クーロン応力変化で概 ね説明される⁹.



図2 熊本地震の地震活動(気象庁一元化震源による).(a) 前震~本震までのM2以上の震央分布.赤線は活断層, 黄色三角は活火山.(b)本震後1ヵ月間のM2以上の 震央分布.太青線は熊本地震の地表地震断層(c)前 震~本震後1ヵ月のM2以上の時系列.

3. 波形・測地インバージョンによる震源断層モデル

Kubo et al. (2016)¹⁰⁾は、防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net, F-netの波形データを用いて、地表断 層トレースや余震分布に基づく屈曲した震源断層を想定 した時間発展波形インバージョンを行った(図3).そ の結果、北西に高角度で傾斜する布田川断層中央部で 最大変位3.8mを示す震源断層モデルを構築した.この モデルでは、全域で右横ずれを示すものの、この最大変 位部周辺では正断層変位も顕著である.この傾向は後述 する干渉 SARの結果や、地表地震断層調査の結果とも 整合する.同様の震源インバージョン解析はAsano and Iwata (2016)¹¹⁾でも示されている.ただし、震源断層 北東端について、Kubo et al. (2016)¹⁰⁾が阿蘇カルデラ 北部の阿蘇市にまで延ばしているのに対し、Asano and Iwata (2016)¹¹⁾はカルデラ西部までとしている.

一方,熊本地震では陸域観測技術衛星2号(以下 ALOS-2)によって,地震後に迅速かつ高空間分解能の 観測が行われ,同地震による地殻変動が解明された.衛 星進行方向に対して左右両方向からの電波照射によって 観測頻度も向上し,深部震源断層の推定のみならず,数 cm程度の微小変位を伴った地表地震断層の正確な位置



図3 波形インバージョンによる熊本地震の震源断層モデル¹⁰⁾.
 (a) 最終すべり量分布の平面投影図. コンターは 0.8m.
 星印は震央,薄い青円は本震後1日以内の M≥1余震,灰色円は1ヵ月以内の M≥1余震.
 (b) 最終すべり量分布の断面投影. ベクトルは上盤側でのすべりの向きと大きさを示す.

や変位量の把握にも寄与した.前震(M6.5)では,布 田川断層帯の北西部で最大約 9cm の北西向きまたは隆 起の変動が認められ、南西部では最大約 12cm の東向き または沈降の変動が検出された^{12),13)}.本震(M7.3)では, 複数の干渉 SAR による組み合わせから 2.5 次元解析が 実施され、布田川断層による顕著な右横ずれだけではな く、同断層中央部に向かって北側が最大約1.5m 沈降す る地殻変動が見いだされた¹²⁾. 国土地理院 (2016)¹⁴⁾は, これらの SAR 解析および GNSS 観測から,3つの断層 から構成される震源断層モデルを提案した(図4).こ のうち、断層 A1 は布田川断層に対応し、北傾斜 60°°で 右横ずれだけではなく正断層成分も含む. 断層 B は日 奈久断層北端に相当し,北西傾斜の右横ずれ断層である. 断層 A2 は南東に傾斜するのが特徴で、既知の活断層へ の対応はないが, 地表は後述する地表地震断層に対応す る.

4. 地表地震断層

熊本地震の本震に伴って、北東に延びる長さ約30 km の地表地震断層(以下,地震断層)が甲佐町・御船町・ 益城町・西原村・南阿蘇村にかけて出現した^{15),16}(図5). 地震断層は、地震調査研究推進本部(2013)¹⁷⁾の定義し た日奈久断層帯高野一白旗区間の北部と布田川断層帯 布田川区間に沿って現れ、益城町堂園で最大2.2 mの右 横ずれ変位を記録した(以下では、日奈久断層帯高野-白旗区間の北部を日奈久断層北端、布田川断層帯布田川 区間を単に布田川断層とする). これらの地震断層位置 は、前述の震源断層モデル、余震分布などから推定され た地表の到達位置におおむね整合する. 変位量について も、地表踏査による計測値は震源断層モデルよりもやや 小さいものの、分布傾向に大きな矛盾はみられない. な お、今回の地震では干渉 SAR による断層位置を手掛か りに微小地表変位を確認した地点もある.



図 4 国土地理院による干渉 SAR 解析結果と震源断層 モデル¹⁴⁾.



図 5 2016 年熊本地震の地震断層¹⁵⁾. a) 地震断層と既知の活断層,余震分布の関係. b) 日奈久断層および布田川断層沿いに出現した地震断層の右横ずれ変位量分布,出ノ口断層沿いの上下変位量分布.

4.1 布田川断層沿いの地震断層

単一地点で最大右横ずれ変位が観測されたのは、益 城町堂園地区である.当地区では畑の畦や畝が断層に よって 2.2m 食い違っていた(図 6a).断層はこの堂園 地区から西へ大きく2つに分岐する.北側の地震断層は, 木山川周辺の水田に約 4km にわたって出現し、さらに 西に向かって被害の大きかった益城町の中心部まで延び る.この断層トレースは、ほぼ木山断層¹⁸⁾に沿うが、変 動地形は明瞭ではなく既存の活断層図には示されていな かった.一方、南側の地震断層は山麓沿いの既知の布田 川断層に沿って西南西に延び、日奈久断層に合流する. これらの断層トレースはすべて顕著な右横ずれ変位を伴 い、複数の断層トレース上での変位量を合算すると、最 大 2.5m に達する.

益城町堂園地区から東の西原村でも、既知の布田川断 層沿いに明瞭な右横ずれ断層変位が確認された.ただし、 益城町側ほど連続性は良くなく、分布が断続的となる区 間もある.西原村では、地震断層は農業用の大切畑ダム の堤体を約1.5m 右横ずれさせて横切る.地震断層はさ らに西原村を抜け南阿蘇村へ連続する.この部分は既知 の北向山断層に一致する^{18),19)}.地震断層は外輪山を構 成する第四紀火山岩類を基盤とする鞍部列などの断層変 位地形沿いに現れた.南阿蘇村立野地区では、立野溶 岩など後カルデラ期の数万年前の溶岩を横切り、カルデ ラ内に延びる.

阿蘇カルデラ内の地震断層は南阿蘇村立野地区から 黒川を隔てて北東に連続する.落橋した阿蘇大橋の向か いの水田では,約1.5mの右横ずれを示す地震断層が観 察された.地震断層はさらに北東に向かって被害の大き かった黒川地区の集落内を通過する.その後,北にステッ プして,東海大学阿蘇校舎,阿蘇ファームランド内を横 切り,南阿蘇村と阿蘇市の境界付近まで延びる.

4.2 出ノロ断層沿いの地震断層

干渉 SAR 解析から明らかになった布田川断層中央部 での北落ちの上下変位は,現地でも断続的に確認された. この上下変位は,布田川断層帯東部では,布田川断層か ら1-2km 南に並走する出ノロ断層沿いで顕著になる. この新鮮な正断層崖は同断層沿いに約10km にわたって 出現し,最大約2m に達する(図6b).布田川断層沿い の右横ずれと出ノロ断層沿いの正断層変位が並走する状 況は,震源断層での斜め横ずれ変位が地表でスリップ パーティショニングを起こしたものと解釈されている²⁰⁾.

4.3 日奈久断層沿いの地震断層

布田川断層から続く地震断層は,南西に向かって日 奈久断層上へ連続する(図6c).両断層の接合部から北 西へも断続的に地震断層が約2.5 km 連続するが, これ らの変位は概ね20 cm 以下である. 日奈久断層上の約 5km にわたる地震断層はきわめて連続性が良く並走や分 岐はみられず,上下変位はほとんど観察されない. 布田 川断層と同様に右横ずれを示す. 御船町高木地区で最大 約70 cm である. 目視で確認できる地震断層の南端は 甲佐町の緑川右岸付近である.



図6 熊本地震の地震断層.(a)益城町堂園地区における2.2m の右横ずれ変位.(b)西原町小森牧野における出ノロ 断層沿いの正断層変位.(c)御船町小坂地区における 約50cmの右横ずれ変位.

4.4 その他の地震断層

熊本地震では、干渉 SAR 解析によって、主地震断層 帯から 10km 以上遠方にまで多数の断層変位が確認され た²¹⁾. このような小変位は 200 個所以上にのぼり、最大 で 40cm もの変位が検出されている (図 7). 一部は地表 踏査でも分布が確認され、既知の活断層に沿って出現し たものも多数存在する (例えば²²⁾). また、後日実施さ れたトレンチ調査によって、同様の変位が過去にも繰り 返されたことが明らかにされている (例えば²³⁾). これ らの断層では、ごく一部を除いて余震が認められず、地 震動生成にも全く寄与していない.そのため,断層変位 は地震発生層上端以浅と考えられ,「お付き合い断層」 とも称される²⁴⁾.また,必ずしも本震による静的歪み変 化で説明はできず,本来蓄積されていた浅部の歪みが地 震動で誘発されたものと推定されている²⁵⁾.



図7 干渉 SAR 解析から明らかになった阿蘇外輪山北西にお ける熊本地震時の小断層変位と活断層との関係²¹⁾(第 218 回地震予知連絡会記者会見資料より).

5. 余効変動と長期余震活動

熊本地震では、明瞭な余効変動も干渉 SAR 解析から 捉えられている.国土地理院(2016)¹²⁾による解析では、 日奈久断層帯北端、出ノロ断層など、地震時に変位した 断層の一部で余効すべりが検出されている。断層のごく 浅部で余効すべりが継続していることが示唆される.ま た、中尾ほか(2018)²⁶⁾は国立大学法人 GNSS 観測グルー プと国土地理院 GEONET の連続観測データに基づき、 日奈久断層帯周辺の余効変動を明らかにした.それによ ると、地震後の日奈久断層での右横ずれ余効すべりは約 18cm に達し、2019 年 4 月現在でも余効変動は継続して いる.

一方で、空間的に長波長の変動も観測されている。布 田川断層帯周辺では隆起と西向きの変動が、その周辺 では沈降と東向きの変動が確認されている。布田川断 層に沿って変位不連続は認められないことから、下部地 殻・上部マントルによる粘性緩和による余効変動と考え られている (例えば²⁷⁾). 上記の中尾ほか (2018)²⁶⁾も, GNSS の時系列を説明するために,余効すべりだけでは なく粘性緩和効果を加えている.

日奈久断層帯での余効すべりは、御船町高木にて目視 でも確認される.正確な計測値ではないが、同地区で地 震時に 50cm の右横ずれを示したブロック塀(図 8a)が 1年後には約 70cm にまで変位が拡大した(図 8b).そ の他、地震後にアスファルト補修工事が行われたにも関 わらず、雁行状の亀裂発生が確認されている(図 8c).

熊本地震の余震は順調に減衰しているものの,広域性 は長期にわたって保たれている.令和元年(2019年)1 月3日には熊本一福岡県境付近の熊本県和水町で震度6 弱を観測する M5.3 の地震が発生した.地震調査研究推



図8 御船町高木地区における日奈久断層の余効すべり.(a) 熊本地震本震直後.地震断層は家屋とブロック塀をほ ぼ垂直に横切り,ブロック塀が屈曲している.(b)本 震から約1年後.変位が進み,ブロック塀が破壊さ れて変位している.(c)地震後に舗装修復されたアス ファルト道路に再度亀裂が出現.国道443号線の西約 150mの地点.



図9 熊本地震の地震断層沿いのトレンチ調査結果のまとめ³¹⁾.

進本部は熊本地震との関係を否定しているが²⁸⁾,熊本 地震による静的クーロン応力によって活発化した地域の 1つという見方もある²⁹⁾.一方で,Nanjo et al. (2019)³⁰⁾ は熊本地震時に活動しなかった日奈久断層帯中央部で熊 本地震後に顕著に低いb値とp値を検出している.本 震による応力載荷に加えて,余効変動による影響も考察 されている.

6. 熊本地震前後の長期評価

第4節で示したように、本震(M7.3)時に日奈久断 層北端と布田川断層が活動し、長さ約30kmの区間にわ たって地震断層が現れた。布田川断層は地震調査研究 推進本部が長期評価を行っている約100の主要活断層の 1つであり、長期評価の公表後に顕著な断層変位を伴っ た地震が発生したのは神城断層以来2例目となった。熊 本地震発生前の評価では、布田川断層の平均活動間隔 は8,100~26,000年、最後の活動が約6,900年前~2,200 年前とされ、30年確率は「ほぼ0~0.9%」と評価され ていた¹⁷⁾.

しかし, 地震発生後に各種研究機関が実施した調査 結果をみると, 布田川・日奈久断層帯の熊本地震活動区 間の活動間隔は2,000 ~ 4,000 年程度で, 地震前の評価 よりも顕著に短い (例えば³¹⁾, 図9). また, 最新活動 時期は約2000 年前とする調査結果も複数報告されてお り, 熊本地震時に経過率 (最新活動からの年数/平均活 動間隔)が1を上回っていた可能性もある. 一方, 日奈 久断層帯日奈久区間など, 熊本地震時に動かなかった区 間の調査や取りまとめ作業も進行中であり(例えば³²⁾), 両断層帯の長期的連動性や今後の未破壊区間の地震発 生ポテンシャルなどを議論する資料が整いつつある.

7. おわりに

平成28年熊本地震は、都市を襲った内陸大地震とし ては平成7年の兵庫県南部地震以来となった.また,主 要活断層帯の1つが活動したという意味で、長期評価の 予測向上へつながる要点や限界、問題点も明らかとなっ た. さらに、活断層帯近傍の M6.5 という一回り小さな 地震から活動が始まり、活断層による M7.3 の本震へと つながった. このような地震活動の時空間変化のみなら ず地殻変動についても詳細なデータが記録され、活動域 の拡大やプレスリップを示唆する地殻変動も指摘されて いる.長期評価と短期的な変動を結びつける評価法が必 要とされる. 奇しくも, 2019年7月にはカリフォルニア 州東部で類似のシーケンスでリッジクレスト地震が発生 した(M6.4 発生 34 時間後に近傍で地表地震断層を伴う M7.1 地震が発生)³³⁾. この地震でも,共役関係の複数 の断層が関係するなど,複雑な断層形状も熊本地震と共 通している. 熊本地震が必ずしも希な現象ではなく, 熊 本地震の観測データや研究成果が今後の中短期予測の 改善に役立つものと思われる. なお、「遅れ破壊」とい う観点からは、現在も余効変動が継続中であり、今後も 詳細な地震と地殻活動のモニタリングに基づく周辺活断 層への影響評価が急がれる。

参考文献

- 防災科学技術研究所,2016. 平成28年(2016年) 熊本地震による強震動, http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/ html20160414212621/main_20160414212621.html, http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/topics/ html20160416012405/main_20160416012405.html
- 総務省消防庁,2019. 熊本県熊本地方を震源とする 地震(第121報), https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/ kumamoto.pdf
- 3)気象庁,2016. 平成28年4月14日21時26分頃の 熊本県熊本地方の地震について、 http://www.jma.go.jp/jma/press/1604/14a/ kaisetsu201604142330.pdf
- Nanjo, K. Z., and A. Yoshida, 2017. Anomalous decrease in relatively large shocks and increase in the p and b values preceding the April 16, 2016, M7.3 earthquake in Kumamoto, Japan. *Earth, Planets, and Space*, 69, 13, doi:10.1186/s40623-017-0598-2.
- Kato, A., J. Fukuda, S. Nakagawa and K. Obara, 2016. Foreshock migration preceding the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, doi: 10.1002/2016GL070079.
- 6)清水 洋・松本 聡・松島 健・相澤広記・塚島 祐子・神薗めぐみ・志藤あずさ・千葉慶太・内田和也・ 塚本香織・光岡郁穂・村松 弾・山下裕亮,断層 帯周辺の地殻構造の解明のための調査観測,2019. 平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査, 平成28~30年度成果報告書(文部科学省研究開 発局・国立大学法人九州大学),439-483.
- Yoshida, S., 2016, Earthquakes in Oita triggered by the 2016 M7.3 Kumamoto earthquake. *Earth, Planets,* and Space, 68:176. doi:10.1186/s40623-016-0552-8.
- Matsumoto, S., S. Nakao, T. Ohkura, M. Miyazaki, H. Shimizu, Y. Abe, H. Inoue, M. Nakamoto, S. Yoshioka, and Y. Yamashita, 2015. 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.

- Stein R.S., and Toda S., 2016. How a M=6 earthquake triggered a deadly M=7 in Japan. *Temblor*, http://doi.org/10.32858/temblor.009.
- 10) Kubo, H., W. Suzuki, S. Aoi, and H. Sekiguchi, 2016.

Source rupture processes of the 2016 Kumamoto, Japan, earthquakes estimated from strong-motion waveforms. *Earth, Planets and Space*, 68:161, doi: doi:10.1186/s40623-016-0536-8.

- 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 and Space*, 68:147, doi:10.1186/s40623-016-0519-9.
- 12) 国土地理院, 2016. 平成 28 年熊本地震に関する情報. http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H27-kumamotoearthquake-index.html.
- Kobayashi, T., 2017. Earthquake rupture properties of the 2016 Kumamoto earthquake foreshocks (Mj 6.5 and Mj 6.4) revealed by conventional and multipleaperture InSAR. *Earth, Planets and Space*, 69:7, doi:10.1186/s40623-016-0594-y.
- 14) 国土地理院, 2016. 平成 28 年熊本地震の震源断層モデル (暫定).

https://www.gsi.go.jp/common/000140781.pdf

- 15) 熊原康博・後藤秀昭・中田 高・石黒聡士・石村大 輔・石山達也・岡田真介・楮原京子・柏原真太郎・ 金田平太郎・杉戸信彦・鈴木康弘・竹竝大士・田 中 圭・田中知季・堤 浩之・遠田晋次・廣内大助・ 松多信尚・箕田友和・森木ひかる・吉田春香・渡辺 満久、2016. 2016 年熊本地震に伴う地表地震断層 の分布とその特徴. 2016 年 5 月 25 日,日本地球惑 星科学連合連合大会 2016 年大会講演要旨, https://confit.atlas.jp/guide/event-img/jpgu2016/ MIS34-05/public/pdf?type=in.
- 16) Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N. Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D. and Miyakawa, A., 2016. Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan. *Earth, Planets and Space*, doi 10.1186/s40623-016-0559-1.
- 17) 地震調査研究推進本部地震調査委員会,2013. 布田 川断層帯・日奈久断層帯の評価(一部改訂), https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_ pdf/93_futagawa_hinagu_2.pdf
- 18)渡辺一徳・籾倉克幹・鶴田孝三,1979. 阿蘇カル デラ西麓の活断層群と側火口の位置. 第四紀研究, 18,89-101.
- 19)活断層研究会編,1991.「新編 日本の活断層-分布図 と資料-」,東京大学出版会,437p.

- 20) Toda, S., H. Kaneda, S. Okada, D. Ishimura, and Z. Mildon, 2016. Slip-partitioned surface ruptures for the Mw 7.0 16 April 2016 Kumamoto, Japan, earthquake. *Earth, Planets and Space*, 68, 188.
- Fujiwara, S., H. Yarai, T. Kobayashi, Y. Morishita, T. Nakano, B. Miyahara, H. Nakai, Y. Miura, H. Ueshiba, Y. Kakiage and H. Une, 2016. Small-displacement linear surface ruptures of the 2016 Kumamoto earthquake sequence detected by ALOS-2 SAR interferometry. *Earth, Planets and Space*, 68, 160.
- 22) Goto, H., Tsutsumi H., Toda, S., and Kumahara, Y., 2017. Geomorphic features of surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake in and around the downtown of Kumamoto City, and implications on triggered slip along active faults. *Earth Planets and Space*,

doi:10.1186/s40623-017-0603-9.

- 石村大輔・熊原康博・堤 浩之・遠田晋次・市原
 季彦・高橋直也・高田圭太・加藤佑一,2018.2016
 年熊本地震に伴う微小変位地点における古地震調
 査.日本地球惑星科学連合2018年大会.講演要旨, https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2018/subject/ SSS08-07/detail
- 24) 宇根 寛・中埜貴元・佐藤 浩・八木浩司・小村 慶太朗,2018. トレンチ掘削による阿蘇外輪山北西 部の「お付き合い地震断層」の累積性の確認と活 断層評価におけるその意義.日本地球惑星科学連 合2018年大会,講演要旨,

https://confit.atlas.jp/guide/event/jpgu2018/subject/ SSS08-11/detail

- 25) 遠田晋次・石村大輔, 熊本地震など内陸大地震で見 いだされた誘発性地表地震断層と短い活断層の評 価, 第四紀研究, 58, 121-136.
- 26) 中尾 茂・八木原 寛・榊原直美・伊藤武男・松 廣健二郎・西村卓也・山崎健一・小松信太郎・田 部井隆雄・大久保慎人・山品匡史,2019. 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,平成28年熊本地震を踏まえた総 合的な活断層調査,平成28~30年度成果報告書 (文部科学省研究開発局・国立大学法人九州大学),

484-517.

27) Pollitz, F. F., Kobayashi, T., Yarai, H., Shibazaki, B., & Matsumoto, T., 2017. Viscoelastic lower crust and mantle relaxation following the 14–16 April 2016 Kumamoto, Japan, earthquake sequence. *Geophys. Res. Lett.*, 44, 8795–8803,

https://doi.org/10.1002/2017GL074783.

- 28) 地震調査研究推進本部地震調査委員会,2019,2019 年1月3日熊本県熊本地方の地震の評価(平成31 年1月15日公表), https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/ 2019/20190103 kumamoto 2.pdf
- 29) Toda, S., and R. S. Stein, 2019. Quake Connectivity:
 3 January 2019 M=5.1 Japan shock was promoted by the April 2016 M=7.0 Kumamoto earthquake. *Temblor*,

http://doi.org/10.32858/temblor.003.

30) Nanjo, K. Z., J. Izutsu, Y. Orihara, M. Kamogawa, and T. Nagao, 2019. Changes in seismicity pattern due to the 2016 Kumamoto earthquakes identify a highly stressed area on the Hinagu fault zone, *Geophys. Res. Lett.*,

https://doi.org/10.1029/2019GL083463.

- 31)遠田晋次・鳥井真之・奥野 充・今野明咲香・小野 大輝・高橋直也,2019. 熊本地震地表地震断層の 阿蘇カルデラ内の完新世活動履歴 - 南阿蘇村黒川 地区トレンチ調査-,活断層研究,51,印刷中.
- 32) 岡村行信・宮下由香里・阿部信太郎・粟田泰夫・吾妻 崇・東郷徹宏・白濱吉起・丸山 正・大上隆史・ 井村隆介・堤 浩之・後藤秀昭・熊原康博・鳥井 真之,2019. 活断層の活動区間を精確に把握するための詳細位置・形状等の調査及び断層活動履歴や 平均変位速度解明のための調査観測,平成28年熊本地震を踏まえた総合的な活断層調査,平成28~ 30年度成果報告書(文部科学省研究開発局・国立 大学法人九州大学),5-438.
- 33) Stein, R. S., T. Hobbs, C. Rollins, G. Ely, V. Sevilgen, and S. Toda, 2019. Magnitude 7.1 earthquake rips northwest from the M6.4 just 34 hours later. *Temblor*, http://doi.org/10.32858/temblor.037.