

短報 Short Report

天然記念物に指定された2016年熊本地震の地表地震断層と火山域での横ずれ変位速度の時間的变化

後藤秀昭¹・山中 蛍²・竹本仁美³

Surface Ruptures Associated with the 2016 Kumamoto Earthquake Designated as a Precious Natural Treasure and the Change in Slip Rate at the Volcanic Area

GOTO Hideaki¹, YAMANAKA Tomoru², TAKEMOTO Hitomi³

要旨：2016年熊本地震の地表地震断層の一部が天然記念物として保存された。本稿では、保存された三箇所の地形を記載し、活断層の位置との関係を検討した。潮井神社と堂園に出現した地震断層は、最大級の2m程度の変位を示し、変動地形学的に認識された活断層線の近くに出現したが、福原では全く予見できない場所に地震断層が現れた。本稿では、さらに、阿蘇山の側火山の噴出物である高遊原溶岩が布田川断層によって470～510m程度横ずれしていることを報告した。布田川断層の過去約9万年間の横ずれ平均変位速度は5.2～5.7mm/年と算定され、地震断層の変位量と過去約1.5万年間の古地震から推定される変位速度とに大きな齟齬がある。数万年間で変位速度が異なる例は我が国では知られておらず、火山噴出直後は断層周辺の温度や歪みの状態がその後と異なっていた可能性が考えられた。火山周辺で算出される変位速度では算定される時間的な違いを考慮する必要があると考えられる。

キーワード：天然記念物、地表地震断層、変動地形、活断層、2016年熊本地震

Abstract: The surface ruptures of the 2016 Kumamoto Earthquake with a 7.2 magnitude appeared along the northern part of the Futagawa–Hinagu fault zone. The ruptures located at three sites in Mashiki Town in 2016 were designated as a precious natural treasure by the Agency of Cultural Affairs, Japan. Herein, we describe the topography of the displacement along the surface ruptures at the designated areas and examine the relationship between the active fault distribution by tectonic geomorphological interpretation and the surface ruptures that appeared in 2016. At Shioi Shrine and Dozon, surface ruptures with a displacement of approximately 2 m appeared near the location of the active fault line, which was previously known as a fault scarp, displacing the Aso-2 pyroclastic flow and the Takayubaru lava flow. From the viewpoint of tectonic geomorphological interpretation, we could not estimate the surface rupture location at the Fukuhara site, even after the earthquake. The right lateral displacement of the Takayubaru lava flow, which erupted from the Omine pyroclastic cone of the Aso lateral cone in approximately 90 ka, is up to 470-510 m along the Futagawa fault. The mean slip rate during 90 ka is approximately 5.2-5.7 mm/year. This value is much faster than that of this fault in previous studies and shows one of the fastest faults on Japanese islands. Moreover, the slip rate was faster than that calculated based on the displacement along the surface rupture in 2016 and the recurrence interval of the paleo-earthquake during 15 ka. The change in the slip rate of the active fault over a few 10,000 years was not known in the Japanese islands. This suggests that the temperature or stress along the fault plane just after the eruption is different from that in recent geological time. In this case, the timing of the sediment deposition with the slip rate estimation would be critical in evaluating the seismic hazards of the active fault distributed near the volcano.

Keywords: precious natural treasure, surface rupture, tectonic geomorphology, active fault, 2016 Kumamoto Earthquake

I. はじめに

地震が断層活動によって発生することが解明されて

から久しいが、地下の断層を直接観察できる機会はそれほど多くない。地球上で発生するマグニチュード6

1 広島大学大学院人間社会科学研究科：Graduate School of Humanities and Social Sciences, Hiroshima University

2 広島大学大学院人間社会科学研究科大学院生：Graduate student at Graduate School of Humanities and Social Sciences, Hiroshima University

3 広島大学大学院人間社会科学研究科研究員：Researcher at Graduate School of Humanities and Social Sciences, Hiroshima University

以上の地震のうち約20%は日本列島周辺で発生しているとされる（内閣府，2010）が，日本で地表に断層が出現した地震は，小規模なものを含めても，明治以降でもわずか15，戦後では8しかない（図1，第1表）。これらの多くは地震後の復旧活動により姿を消し，今日では現地では観察することができない。土地所有や管理からは地面の形は不変や定型が望ましく，いわば地震発生前の「正常な状態」に戻された，あるいは，新たに「正常な状態」とされたとも言えるだろう。

一方で，地表地震断層（以下，地震断層と表記する）は地震発生のメカニズムを理解したり，地震防災を考える上で，貴重な地物である。強い揺れが発生して被害を与える地震は，揺れが収まれば，結果として生じた被害の様子しか残さず，人間生活が復旧すれば

強い揺れがあったことは現地では理解不能となる。地震発生源を直接観察し続けることができる地震断層は，現地で地震発生の様子を理解するとともに，地域の地殻変動の特徴や地震防災を考える際に貴重な情報となる。

このような代えがたい価値が認められ，これまでに現れた地震断層のうち6の断層が天然記念物として保存されている（第1表）。そのうち根尾谷地震断層の「水鳥の断層崖」と「根尾中の屈曲」は国の特別天然記念物に指定されている。これらは我が国最大の内陸直下型地震である1891年濃尾地震の地震断層であるだけでなく，小藤文次郎によって断層地震説が唱えられる契機となったものであり（Koto, 1893），中部地方の山間地域にありながら国内外の多くの研究者や市民の訪ねる場所となっている。戦後では，1995

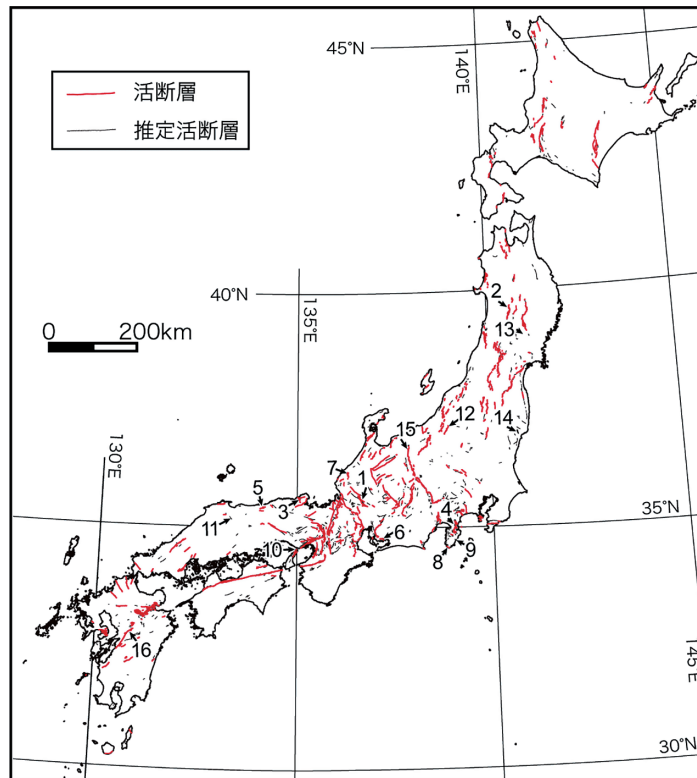


図1 日本列島の活断層と明治以降に出現した主な地表地震断層の分布

図中の番号は表1の番号にも対応する。活断層は中田・今泉編（2002）による。1：濃尾地震（根尾谷断層），2：陸羽地震（千屋断層，川舟断層），3：北丹後地震（郷村断層，山田断層），4：北伊豆地震（丹那断層，姫ノ湯断層），5：鳥取地震（鹿野断層，吉岡断層），6：三河地震（深溝断層）7：福井地震，8：伊豆半島沖地震（石廊崎地震），9：伊豆大島近海地震（稲取大峰山断層），10：兵庫県南部地震（野島断層），11：鳥取県西部地震，12：中越地震（小平尾断層・六日町西縁断層帯），13：岩手・宮城内陸地震，14：福島県浜通りの地震活動（井戸沢断層，湯ノ岳断層），15：長野県神城断層地震（神城断層），16：熊本地震（布田川・日奈久断層）

Figure 1. Distribution of active fault in Japanese Islands and surface ruptures associated with the major earthquakes since the 1890s.

The number labels refer to Table 1. Active faults are after Nakata and Imaizumi eds. (2002). 1 : Nobi Earthquake (Neodani fault), 2 : Rikuu Earthquake (Senya and Kawafune faults), 3 : Tango (Gomura and Yamada faults), 4 : Kitaizu Earthquake (Tanna and Himenoyu faults), 5 : Tottori Earthquake (Shikano and Yoshioka faults), 6 : Mikawa Earthquake (Fukozu fault), 7 : Fukui Earthquake, 8 : Izu-Hanto-Oki Earthquake (Irouzaki fault), 9 : Izu-Oshima-Kinkai Earthquake (Inatori-Omineyama fault), 10 : Hyogo-ken-Nambu Earthquake (Nojima fault), 11 : Tottori-ken-Seibu Earthquake, 12 : Chuetsu Earthquake (Obirou and Muikamachi-Toen faults), 13 : Iwate-Miyagi-Nairiku Earthquake, 14 : Fukushima-ken-Hamadori Earthquake (Idozawa and Yunodake faults), 15 : Kamishiro Fault Earthquake (Kamishiro fault), 16 : Kumamoto Earthquake (Futagawa-Hinagu fault)

表 1 明治以降に出現した主な地表地震断層と天然記念物指定

Table 1. Surface ruptures associated with the major earthquakes since the 1890s and designed precious natural treasures.

	地震名	発生日月	マグニチュード	変位した主な活断層	地表地震断層の長さ (km)	指定名称	天然記念物指定日
1	濃尾地震	1891年10月28日	8.0	根尾谷断層	80	特別天然記念物 (国)	1927年6月14日指定, 1952年特別指定
2	陸羽地震	1896年8月31日	7.2	千屋断層, 川舟断層	36, 6	天然記念物 (国)	1995年2月14日指定
3	北丹後地震	1927年3月7日	7.3	郷村断層, 山田断層	15, 3	天然記念物 (国)	1929年12月17日指定
4	北伊豆地震	1930年11月26日	7.3	丹那断層, 姫ノ湯断層	35, 3+	天然記念物 (国)	1935年6月7日指定
5	鳥取地震	1943年9月10日	7.2	鹿野断層, 吉岡断層	8	鳥取県指定天然記念物	2004年11月9日指定
6	三河地震	1945年1月13日	6.8	深溝断層	19	愛知県指定天然記念物	1975年指定
7	福井地震	1948年6月28日	7.1	—	25		
8	伊豆半島沖地震	1974年5月9日	6.9	石廊崎地震	5.5+		
9	伊豆大島近海地震	1978年1月14日	7.0	稲取大峰山断層	4+		
10	兵庫県南部地震	1995年1月17日	7.3	野島断層	10	天然記念物 (国)	1998年7月31日指定
11	鳥取県西部地震	2000年10月6日	7.3	—	6+		
12	中越地震	2004年10月23日	6.8	小平尾断層・六日町西縁断層帯	1+		
13	岩手・宮城内陸地震	2008年6月14日	7.2	—	8+		
14	福島県浜通りの地震活動	2011年4月11日	7.0	井戸沢断層, 湯ノ岳断層	10+		
15	長野県神城断層地震	2014年11月22日	6.7	神城断層	9		
16	熊本地震	2016年4月16日	7.3	布田川・日奈久断層	30	天然記念物 (国)	2018年2月13日指定

資料:

国立天文台編「理科年表プレミアム」丸善

一般社団法人日本地質学会「全国天然記念物めぐり: 都道府県指定の地質・鉱物天然記念物一覧」(<http://www.geosociety.jp/faq/content0558.html>)国指定文化財等データベース (<https://kunishitei.bunka.go.jp/bsys/searchlist>)

宇佐美龍夫・石井寿・今村隆正・武村雅之・松浦律子 (2013): 「日本被害地震総覧 599-2012」東京大学出版会

地震調査研究推進本部「地震に関する評価」(<https://www.jishin.go.jp/evaluation/>)

注: 長野県神城断層地震は長野県の命名による。

年兵庫県南部地震の野島地震断層の一部が国の天然記念物に指定され、博物館内で保存されている。地震発生の仕組みや地形形成の理解とともに、防災意識の向上に広く活用されている (岡田・中田, 1999)。1995年以降も内陸直下型地震の発生があったものの、変位量の大きな地震断層は出現しなかった。

2016年4月16日に発生した熊本地震では、布田川・日奈久断層帯の北部に沿って断層運動があり、地震断層が出現した (Shirahama et al., 2016, Goto et al., 2017 など)。その一部が2018年に天然記念物に指定され、保存活用が進みつつある。本稿では、指定された箇所の地形とともに、その変動地形学的な意味を記述する。また、地震断層の変位量と古地震から推定される変位速度と、変動地形学的に推定される変位速度とに不調和があることを報告する。熊本地震を通して地震断層とその累積が形成してきたとされる変動地形の関係について議論したい。

II. 活断層と地震断層の概要

布田川・日奈久断層帯は別府-島原地溝帯の南縁を限り、阿蘇カルデラ盆地西縁付近から八代海南部まで、北東-南西~東北東-西南西方向に延びる右横ずれの卓越した活断層帯である (活断層研究会編, 1991)。活断層研究会編 (1991) は布田川断層の活動度をA級としたが、地震調査研究推進本部地震調査委員会 (以下、「地震本部」と表記する) (2013) は

トレンチ 調査結果に基づき布田川断層の変位速度は右横ずれ0.2mm/年、上下0.1~0.3mm/年程度としている。

2016年熊本地震は4月14日と16日の2度、益城町で震度7が観測された地震である。4月14日午後9時26分に発生した地震は日奈久断層北端付近に震央があるM6.5であり、後に前震と呼ばれた (図2)。また、16日午前1時25分の地震は布田川断層の西延長付近に震央があるM7.3の地震で本震とされた。16日の地震では、明瞭な地表地震断層が出現し、地震本部 (2013) の布田川断層帯の布田川区間と日奈久断層帯の高野-白旗区間が活動したとされた (地震本部, 2016)。14日の前震では布田川断層の南西部でわずかながら変位が確認され (Sugito et al., 2016)、益城町の市街地でも変位の可能性が指摘されている (Sugito et al., in press)。

熊本地震の地震断層は、大局的には既存の活断層図に記載されていた場所に沿って出現した (図2)。布田川断層沿いでは概ね右ずれを主体とする地震断層が出現し、並走する出ノ口断層では上下変位を主体とする正断層の地震断層が出現した。一方で、布田川断層西部では山麓の活断層沿いだけではなく、活断層の知られていない木山川の形成した低平な沖積低地を横切って延びる東北東-西南西走向の地震断層が出現した (図3)。また、益城町三竹の北や福原付近には、これに斜交する北西-南東走向の左横ずれ断層が出現

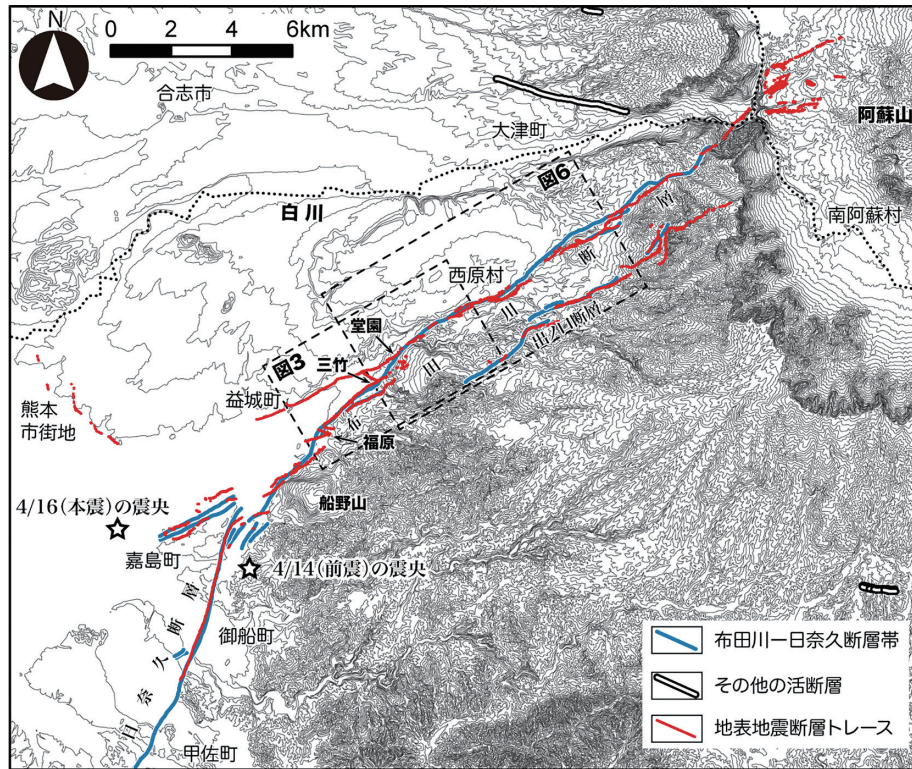


図2 布田川・日奈久断層帯の活断層分布と2016年熊本地震の地表地震断層のトレース
活断層は中田・今泉編 (2002), 地表地震断層のトレースは熊原ほか (2017), 鈴木ほか (2017) による。

Figure 2. Distribution of active faults along the Futagawa-Hinagu fault zone and the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto Earthquake.

Active faults are after Nakata and Imaizumi eds. (2002). Surface ruptures are after Kumahara et al. (2017) and Suzuki (2017).

した。

変位量については、地震断層の中央付近に位置する益城町堂園で最大2.2mの右横ずれ変位があり、北東の西原村付近まで約2mの変位があった (Shirahama et al., 2016)。地震断層の両端では断層線が分散し、変位量も減少する傾向にある (Shirahama et al., 2016)。また、布田川断層に並走する出ノ口断層では、最大1m程度の北落ちの上下変位があった。

これらの地震断層が出現した地域の活断層は、変位の累積をもとに既存の研究により詳しく記載されていた (図2)。布田川断層は阿蘇カルデラの排出口にあたる立野から船野山の山麓にかけて東北東-西南西方向に延びており、西部の布田川および木山川沿いの低地ではその南縁に沿った一列の北落ちの断層崖として連続的に認定できる。これらの断層崖は阿蘇山の火砕流堆積面や側火山である高遊原溶岩台地を切断しているものであり、累積的な変位を確認することができる。高遊原溶岩台地を切断する断層崖が認められる西原村付近には、布田川断層の南東に並走して出ノ口断層が分布しており、北落ちの断層崖が連続して確認で

きる一方で、布田川断層に沿っては、横断する河谷や阿蘇山の側火山である大峰火砕丘に右横ずれの変位が認められる (熊原ほか, 2017; 鈴木ほか, 2017)。

布田川断層は、西端近くの嘉島町付近で北東-南西方向に反時計回りに少し向きを変える。布田川断層は、この付近から南西に分岐するように、山麓から北西に離れた位置にも分布しており、段丘面を変位させる地塁と地溝からなる特徴的な断層地形が知られている。

一方、日奈久断層の北東部は、八代平野との境界の峠付近で1条の断層であるが、熊本平野では北東に分岐するように数条に分散し、段丘面上には多様な変形が認められている (熊原ほか, 2017)。北東端付近の高野-白旗区間では、沖積面に変位地形は認められないが、段丘面を変位させる北東-南西走向の1条の直線的なトレースをなす。ここでは、北東部で東落ち、南西部では西落ちの変位を示しており、横ずれ断層に特徴的な断層地形と言える。

本研究ではこれらの断層地形から判読された活断層と、2016年に出現した地震断層の位置について詳細

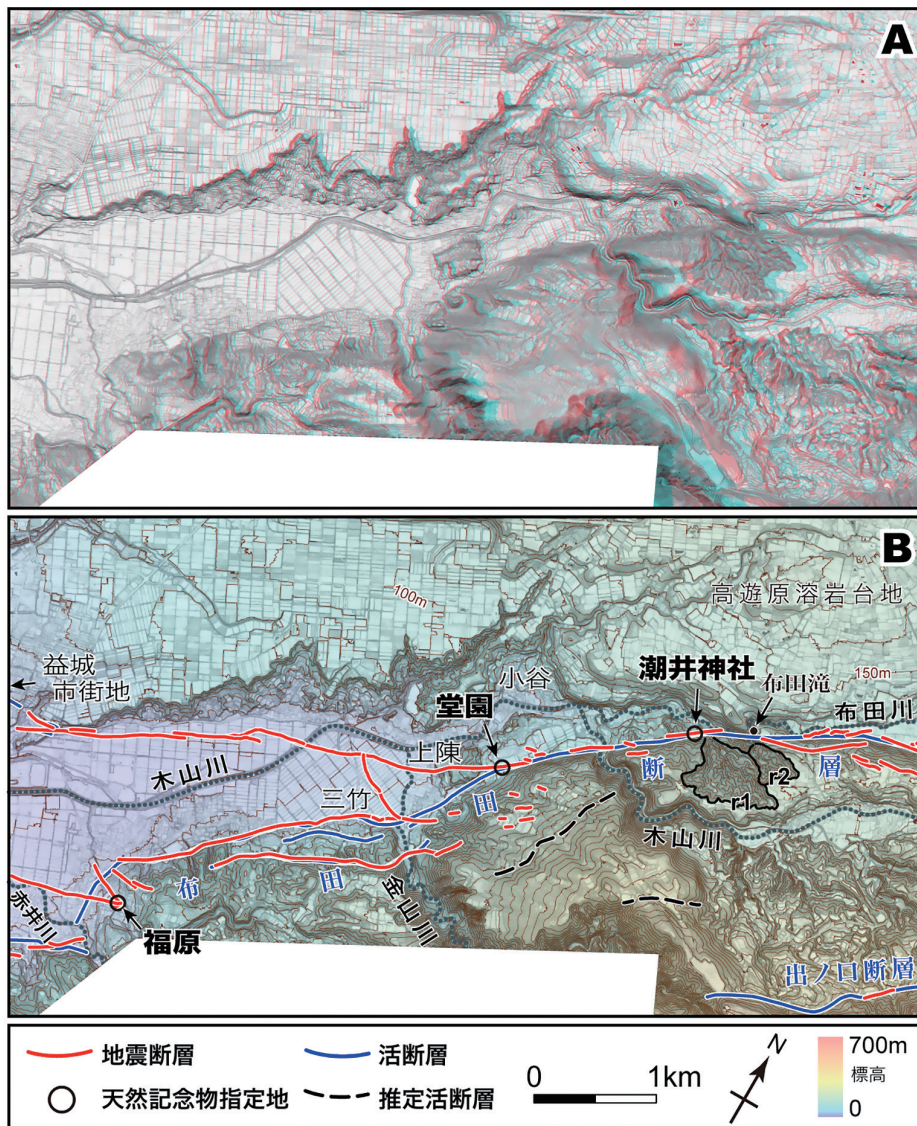


図3 天然記念物に指定された地震断層の位置

A：熊本地震後に取得されたLiDARデータから作成した地形アナグリフ。B：2016年熊本地震の地表地震断層中部と活断層。地表地震断層のトレースは熊原ほか（2017）、鈴木ほか（2017）による。活断層の分布図はAを判読して筆者ら作成。

Figure 3. Location of surface rupture designed precious natural treasures showing on the active fault distribution map.

A: Topographical anaglyph produced from the 2m-mesh DEM obtained by airborne LiDAR. B: Distribution of active faults and surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto Earthquake in the central portion of the Futagawa fault. Surface ruptures are after Kumahara et al. (2017) and Suzuki (2017). Active faults were identified by tectonic geomorphological interpretation of the topographical anaglyph (A).

に記載をする。

Ⅲ. 保存された地震断層と活断層との関係

2016年に出現した地震断層のうち、益城町の3カ所が天然記念物に指定され、保存されている（図3）。ここでは、それらの地形と活断層との相対的な位置関係を記述したい。上記のとおり、事前に明らかにされていた活断層の分布と地震断層の出現位置は大局的には一致していたと言えるが、細かく見ると百m程度のずれがある場所も少なくないと指摘されている（今

野・遠田，2018）。天然記念物に指定された3カ所でも、潮井神社ではほぼ予想された位置に出現したものの、堂園では数m程度北東の位置に出現し（岩佐ほか，2020）、福原では全く予想できない場所に出現したと言える。

1. 潮井神社

潮井神社は布田川断層の断層崖の基部から湧出する湧水地の上に位置し、雨乞いの神社とされる。崖の基部から高さ約3mの階段を上がり、小起伏となった斜

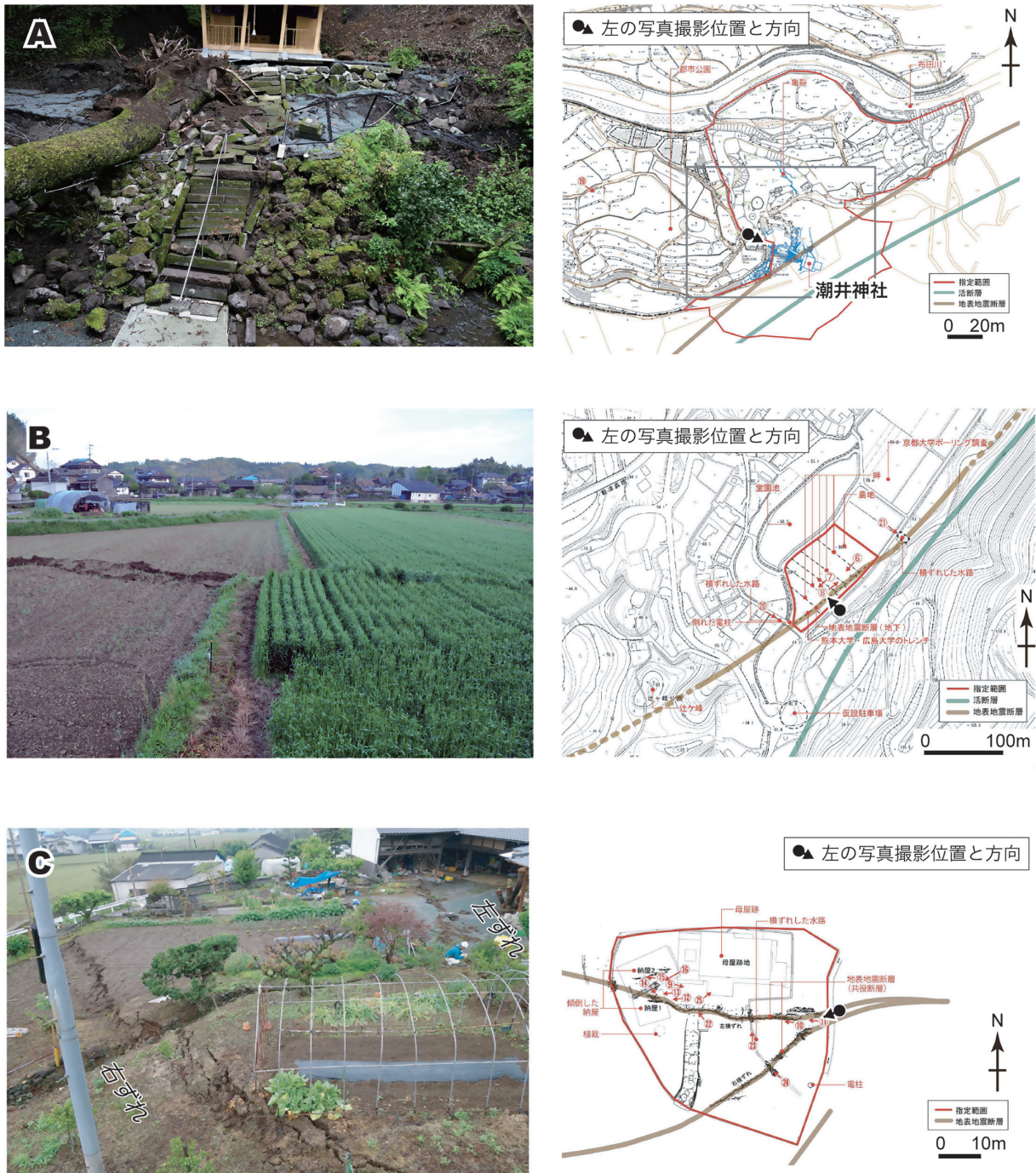


図4 天然記念物に指定された地震断層（左）と指定区域（右）

A: 潮井神社, B: 堂園, C: 福原。右の指定区域の図は熊本県益城町教育委員会（2020）：「天然記念物布田川断層帯保存活用計画書」（<https://www.town.mashiki.lg.jp/kiji0034369/index.html>）による。

Figure 4. Photographs of surface ruptures (left) and designed areas of precious natural treasures (right).

A: Shioi Shrine, B: Dozon, C: Fukuhara. The designed area maps are after the board of education of Mashiki Town (2020).

面に拝殿が建てられている（図4A）。

地震断層は拝殿に上がる階段の途中の参道に主に出現した。階段は上下に2つに分けられ、断層崖基部の鳥居から拝殿前の参道まで上がる高さ3mの下部の階段と、参道から拝殿に上がる短い上部の階段からなる。地震断層は主にこれらの階段の間にある石灯籠の

立つ拝殿前の小さな参道に出現した。これらを踏まえると、断層変位によって形成された小起伏の場所に拝殿が建立された可能性がある。

地震断層の横ずれ変位量は下部から上部にかけて直線的に連続して伸びていた階段を基準として読み取ることができ、上下変位量は拝殿前の広場から読み取る

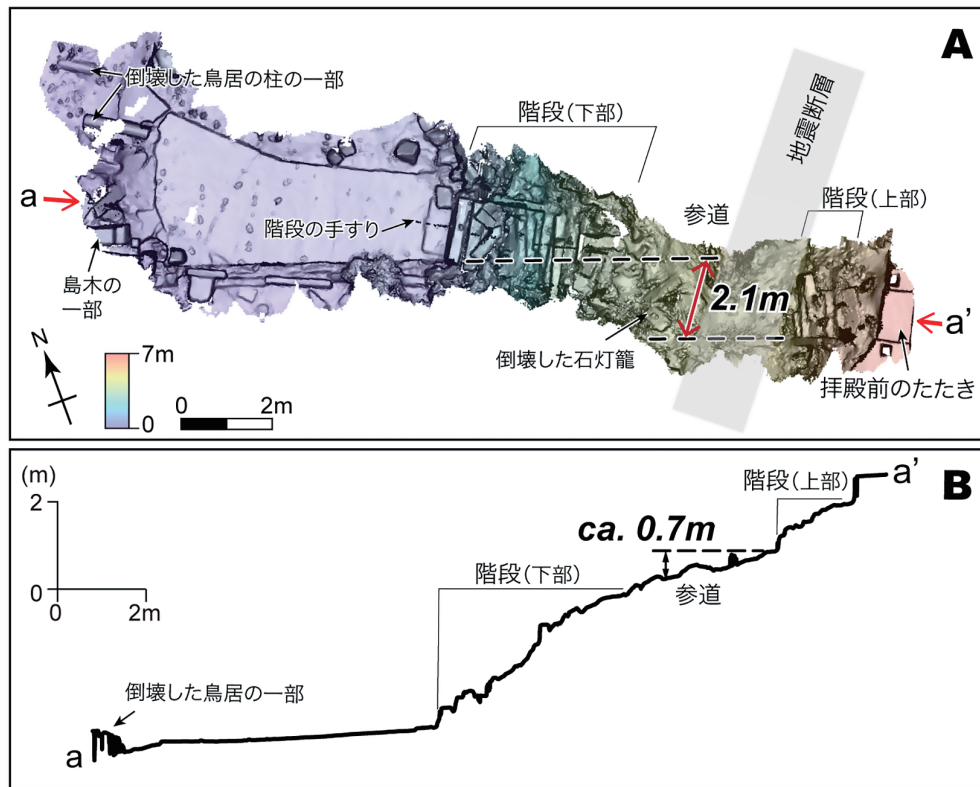


図5 潮井神社前の参道に現れた地震断層

A: 潮井神社前の参道の横ずれ変位, B: 潮井神社参道の地形断面図。2021年4月にiPad ProのLiDARにより計測した結果を図化した。

Figure 5. Surface ruptures appeared on the approach of the Shioi Shrine designed precious natural treasure.

A: The right-lateral offset observed on the approach of the Shioi Shrine. B: The topographical profile and the vertical displacement of the approach of the Shioi Shrine. The location of topographical profile is shown in Figure 5A. Topographical point cloud data were obtained by the iPad Pro in April 2021.

ことができる。階段全体を通してみると、下部の階段には断層変位に伴う引きずりが認められ、それらを加味して階段の南側を基準にすると2.1mの右横ずれが読み取れる(図5A)。一方、上下変位量は平坦であった参道から約0.7mと読み取れる(図5B)。

2. 堂園

天然記念物に指定された堂園^{どうぞん}の右横ずれは、麦畑の畦に生じたものである(図4B)。2016年に生じた変位では最も大きな横ずれ量(2.2m)が報告されている(Shirahama et al., 2016)。ここでは、上下変位はほとんど観察できないが、周辺には多数の地変が観察されており、上下変位が分散したと考えられている(岩佐ほか, 2020)。

木山川から金山川では南には火砕流の堆積する丘陵が広がり、直線状の山麓線を挟んで北西には低地や段丘が分布することから、山麓線に沿って活断層が延びているものと考えられてきた(渡辺・小野, 1969; 熊原ほか, 2017)。したがって、天然記念物に指定さ

れた堂園の麦畑の横ずれ変位は、数m程度北に位置するとはいえ、ほぼ地震前に推定された場所に見出したように見える。この延長のトレース上での上下変位は南側低下(0.35m以下)を示しており、地形的な推定とは異なる様相を呈したが、周辺の地変の調査により、変位が分散し、全体としては北側低下の傾向にあるとされている(岩佐ほか, 2020)。

直線状山麓線の北西には、段丘に挟まれた幅200mほどの北東-南西方向の谷底平野が南西に傾斜しており、かつての木山川の谷底平野と考えられるが、天然記念物に指定された麦畑の南西の谷底平野は幅30m程度と、極めて狭い低地となっており、断層通過地点付近で流路が阻害されるように見える。下流側の隆起運動が繰り返されることで木山川の河川争奪が起こり、北西に流路がシフトしたことや、谷底平野が排水不良となり、堂園池が形成されたとすれば地形の発達も説明可能である。

とはいえ、天然記念物に指定された麦畑から南西の地震断層を地震前に予測することは極めて困難であ

る。堂園から上陳^{かみじん}では山麓に地震断層は見られず、天然記念物に指定された堂園の麦畑付近から上陳の丘陵を横切って南西に続き、木山川の沖積低地を経て益城町の市街地の方向に連続した (Shirahama et al., 2016; 熊原ほか, 2017)。堂園の麦畑の横ずれは、これら地震前に推定できない地震断層の北東端に位置する。また、堂園の麦畑の南東の山麓線は、この南西で反時計回りに向きを変える場所であったことや、木山川の谷底平野が西に開く北東端に位置することなどの地形的特徴を有するものの、地震後でもこれらの地震断層の出現位置を変動地形学的に特定することは困難である。木山川の谷口付近では 2016 年の変位は山麓線付近に生じたものの、堂園の麦畑の横ずれ変位までの区間では断層変位は断続的で、一部は丘陵の中に雁行しながら分散して生じたと報告されている (山口, 2018)。これらを踏まえれば、地下の複雑な断層構造が推定される場所であり、変動地形からすべてを読み解くことは容易でない場所である可能性がある。

3. 福原

天然記念物に指定された福原の地震断層は右ずれと左ずれが近接した場所に出現した極めてユニークなものである (図 4C)。宅地の庭に出現したものであり、宅地がすべて天然記念物に指定された (図 4C 右)。40 ~ 60° 程度で斜交する方向に出現する右ずれ変位の断層と左ずれ変位の断層は共役断層と呼ばれ、北伊豆地震の際の丹那断層と姫之湯断層 (表 1) などのように断層名がつけられる縮尺レベルではこれまでも観察されてきたが、この地域のように長さが 1km 以下の横ずれ共役断層は日本ではこれまでに知られていなかった。

2016 年熊本地震の地震断層は主に北東～東北東の走向をなし、右ずれ変位を示した。一方で、それらが左にステップする区間となった福原付近や金谷川谷口の三竹では、これらをつなぐように、北西～西北西の走向の左ずれ断層が出現した (図 2)。福原の指定された地震断層はその両者が観察できる南東角に当たる場所であり、逆「く」の字をした平面形をなす地震断層が観察される。

母屋前から納屋の下に延びる断層は左ずれを示し、庭中央に出現し宅地入り口の東に延びる断層は右ずれを示した。母屋に通じる通路を基準にして左ずれ 0.8m で、北側が 0.6m 低下、庭の水路を基準に右ずれ 0.6m で、南側が 0.3m 低下した。上下変位からは、断層に挟まれた三角形の領域がブロック状に隆起するような変位があったと言える。

左ずれ変位の断層の真上にあった納屋は、倒壊は免れたものの、土台のずれによって大きく傾き、継続的な使用は不可能となったのに対し、断層からわずかに外れた母屋は構造物としては大きな被害がなかった。断層のずれに伴う災害の様相が理解しやすい状態であった。

福原付近の変動地形からは、赤井川の扇状地を変形させる南北～東北東-西南西方向の撓曲崖として判読できる (図 3)。布田川断層の一般走向とやや異なるが、堂園から三竹を経て延びる北東-南西方向の直線状の山麓線に沿った断層崖と、船野山の北西基部の断層崖をつなぐように延びているように見え、局地的な走向の変化に過ぎないと見なせる。右横ずれ断層が左にステップする区間で逆断層を生じさせるような東西方向の局地的な圧縮が生じていると考えることができ、変動地形学的地形判読からは大きな違和感はない。

しかし、地震断層はこれらの判読とは大きく異なる位置に、異なる変位様式で出現した。上述のとおり、西北西-東南東走向の左ずれ断層が出現しただけでなく、船野山の北西基部の断層崖から約 300m 北西の赤井川の扇状地を横切って断層崖とほぼ並行して右横ずれ断層が出現した。いずれも直線状であり、それぞれの南東端と北東端は接合しており、天然記念物指定地はこの接合部に位置する。

これらの場所に地震断層が出現するのを予想するのは、地震後の変動地形学的判読でもほぼ不可能である。左横ずれの生じた位置は丘陵の南東端であることを考えると、変位の繰り返しがあった可能性は考えられるが、活断層の存在はこれまでの調査では解っていない。

IV. 布田川断層による高遊原溶岩台地の変位

1. 高遊原溶岩と台地の概形

天然記念物に指定された 3 箇所のうち、2 箇所 (潮井神社、堂園) は高遊原溶岩台地の近傍に位置し、いずれも 2016 年の地震の際に最大級の変位が認められた場所である。ここではこれらの変位量をより長期的な変位量と関連づけるために高遊原溶岩台地の変位量を記載したい。

高遊原溶岩台地は大峰火砕丘から西に広がり、東西 9km、南北 4km の台地からなる (図 6)。台地を構成する高遊原溶岩は、阿蘇山の側火山の単成火山である大峰火砕丘の堆積物噴出直後に噴出した溶岩からなり、厚さは平均 70 ~ 80m で体積は 2km³と見積もられている (渡辺・小野, 1969)。この溶岩は阿蘇山の

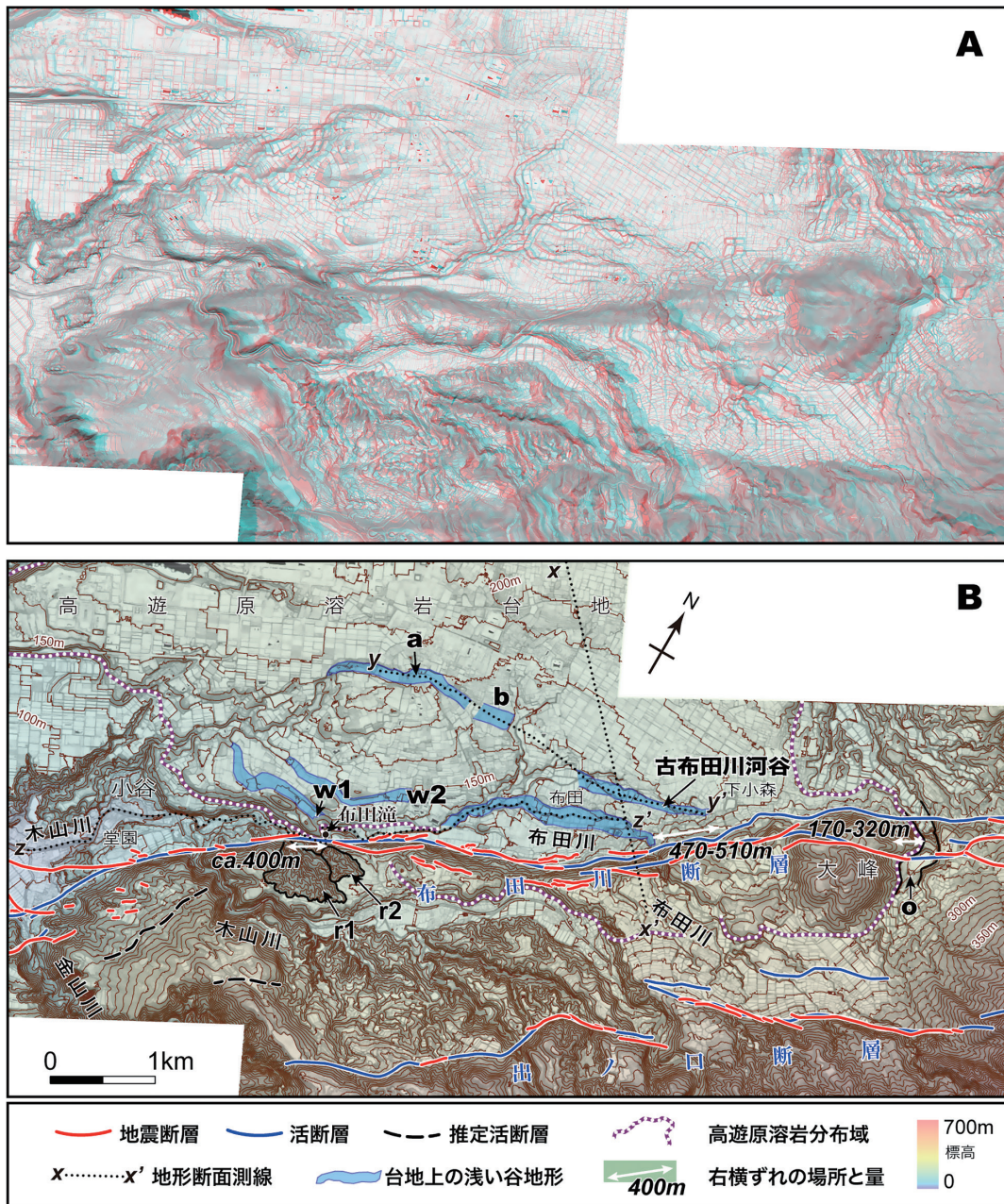


図 6 高遊原溶岩台地の地形と横ずれ変位

A: 熊本地震後に取得された LiDAR データから作成した地形アナグリフ, B: 2016 年熊本地震の地表地震断層と高遊原溶岩台地の横ずれ地形

Figure 6. Tectonic geomorphology and the right-lateral offset observed on the Takayubaru lava flow.

A: Topographical anaglyph produced from the 2m-mesh DEM obtained by airborne LiDAR. B: Geomorphological map of the Takayubaru lava flow. Surface ruptures are after Kumahara et al. (2017). Active faults were identified by tectonic geomorphological interpretation of the topographical anaglyph (A).

規模噴火である Aso - 3 と Aso - 4 に挟まれる層位にあり, Aso - 4 との間には 10cm 程度の薄い古土壌が挟まることから, Aso-4 より少し前の約 9 万年前に噴出したと考えられている (小林・星住, 2017)。

台地の分布域は大峰火砕丘から北西～西南西方向であり, 現在, 見られる台地周辺の地形の大局的な傾斜とよく対応する。したがって, 溶岩噴出時には阿蘇外輪山を切る布田川断層, 出ノ口断層による地形的な概

形が発達していたものと考えられる。現在では, 高遊原溶岩台地, 大峰火砕丘ともに布田川断層に切られており, この側火山は断層という地質的弱面に沿って噴出したものと考えられる。

高遊原溶岩台地は布田川断層の比高約 100m の断層崖によって南北に二分される。以下では, 布田川断層より南東側を台地南東部, 北西側を台地北西部と呼ぶ。南東部は西に傾く最大幅 1km の細長い台地であ

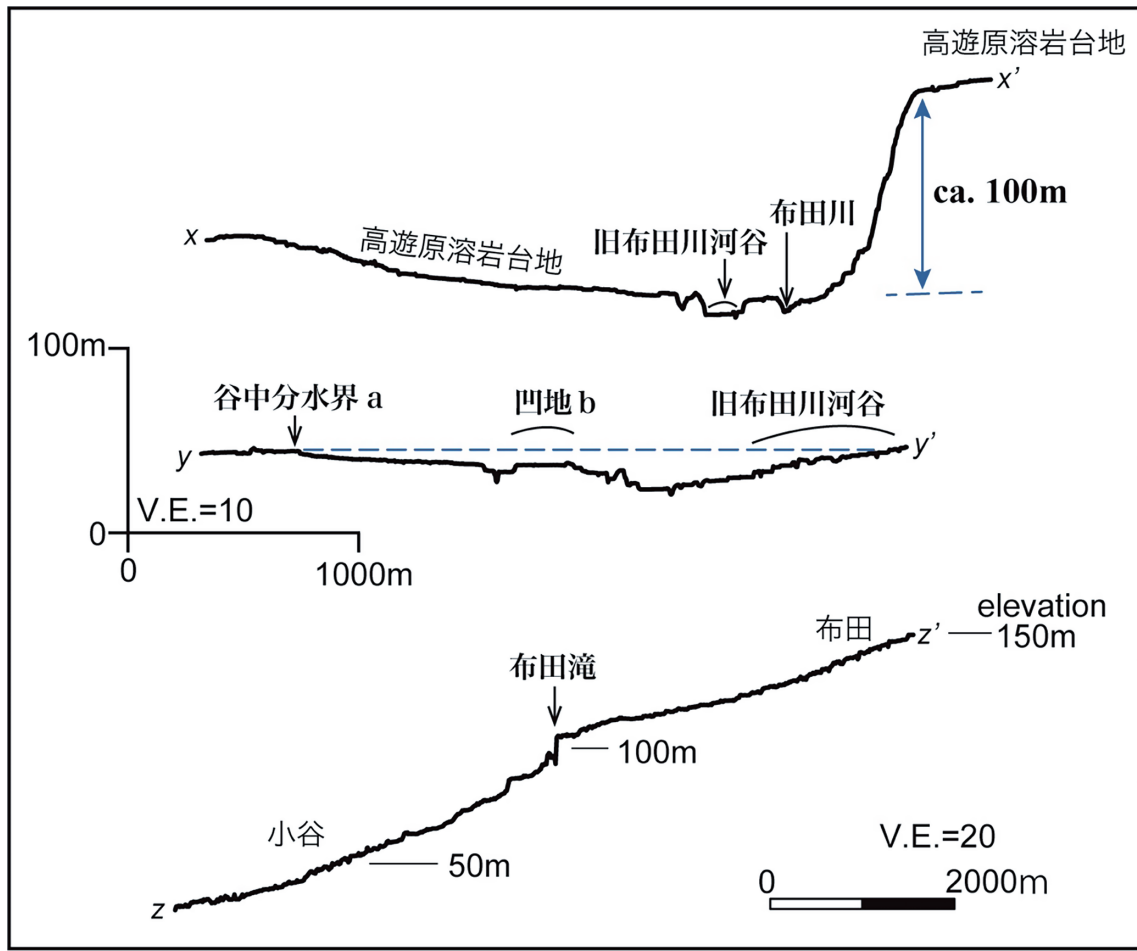


図7 地形断面図

x-x' および y-y' は高遊原溶岩台地を横切る地形断面、z-z' は布田川の河床縦断面図。測線の位置は図6Bを参照。

Figure 7. Topographical profiles across the lava flow (x-x' and y-y'), and along the present river bed of Futagawa river (z-z'). The locations of profiles are shown in Figure 6B.

る一方、北西部は北縁部が最も高く、大局的には断層に向かって緩く傾いている（図7のx-x'）。台地を構成する高遊原溶岩が大峰火砕丘から流下したことを考えると、台地北西部の傾斜は堆積当時とは異なると考えられ、断層面が北西に傾斜する布田川断層の上盤側の変形に伴うものと考えられる。

台地を刻む開析谷はこのような台地の形成とその後の変形を反映した水系発達の結果として読み取ることができる。台地を刻む主な河川である布田川は、高遊原溶岩台地の南東部では台地面を刻む深い谷をなしており、上流の先入蛇行をなす流路とあわせて考えると、断層崖を刻む谷は、断層活動以前に形成された先行谷ということができる。一方、高遊原溶岩台地の北西部を流下する布田川は台地北縁近くに分水界があり、断層に向かって南南東～南東方向に流下して布田付近で合流する。布田川は、ここより下流では、断層崖の麓を断層に沿うように西南西方向に流下し、布田

滝を経て杉堂の低地に向かう。

高遊原溶岩台地北西部のうち、西半部には東西に延びる谷地形が発達しており、断層崖近くは特徴的な地形が認められる。すなわち、小谷を経て布田川に合流する小河川の上流は、現在流下する河川の規模に比べて広い幅の浅い谷が連続し、その上流には谷中分水界（図6のa）や風隙地形（図6のw1, w2）が認められる。

これらの地形は、溶岩台地形成直後の谷地形の発達と、その後の布田川断層の活動の進展に伴う河川争奪によって説明可能である。溶岩台地形成直後には、当時の台地の一般傾斜に従って布田川は北西に流下した後、台地北西部ではやや向きを変えて西に流下していたが、断層面が北西に傾斜する布田川断層の活動に伴って断層崖直下に凹地を作るように台地面が南に反転するように傾いたことに伴い、台地北西部の東半部では布田川は南流する水系が新たに生じた。さらにそ

の後、西半部では台地中央付近を西に流れていた布田川が布田滝を流れる断層崖直下の河川に上流部を奪われる河川争奪が起こったとすれば無理なく地形発達を説明することができる。現在の布田川が杉堂の東で布田滝のある峡谷部を流下していることや、それを挟んで河床勾配が異なること(図7のz-z'), 小谷を流下する河川が広く浅い谷を穿つように谷頭侵食を進展させている様子とも矛盾しない。したがって、高遊原溶岩台地を刻む谷や侵食崖を詳しく観察することで、台地形成以降の断層変位の総量を推定することができると思われる。

2. 高遊原溶岩台地の横ずれ量と算定される変位速度

高遊原溶岩台地とその開析谷の発達を踏まえると、高遊原溶岩の横ずれ変位量を3箇所推定、計測することができた。以下、東から記述する。

1) 大切畑の開析谷

大切畑では大峰火砕丘の東縁や大切畑ダムのある開析谷が右横ずれしていること(図6Bのo)が指摘され、変位量は170~320mとされている(石村, 2019)。開析谷の横ずれは一般に開析される地形面の形成後、開析谷が断層を横断した後の変位量を示しており、断層より上流が長い河川を有する開析谷ほど大きな変位量を示すことが知られている(安藤, 1972)。したがって、ここで見られる変位量は大峰火砕丘および高遊原溶岩堆積以降の下限值を示しており、総変位量はさらに大きい可能性が高い。

2) 布田の古布田川河谷

布田付近では、布田川の北に布田川と平行するように西流する河川が認められる。この河川は下小森付近を最上流として流下しているに過ぎないにも関わらず、台地面を開析する谷の幅は約100m程度で布田川の河谷と同程度の幅と深さを有する(本稿では、この河谷を古布田川河谷と呼ぶ)。古布田川河谷および、この北の台地面は西に傾斜しており、その西延長には小谷を流下する河谷の谷中分水界(図6Bのa)が位置しており、それらの間には浅い凹地状の地形(図6Bのb)が連続する。これを縦断する地形断面図を見ると(図7のy-y'断面)、南流する河川の水系下にある浅い凹地状の地形の区間でやや低いものの、古布田川河谷の上流部と谷中分水界(図6Bのa)より西は西流する一連の河川であったように認識できる。高遊原溶岩流下直後の必従河川であった西流する水系があったが、断層に伴う高遊原溶岩台地の南への傾動によって南流する河川が形成され、古布田川河谷の下流延長部(図6のa)が南流する河川に争奪された結果

とみるのが合理的であろう。

古布田川河谷を形成できる規模の河川は現在の布田川以外に想定することは困難であり、高遊原溶岩流下直後の必従河川として流下した跡と考えるのが適当である。このような地形発達に基づけば、高遊原溶岩台地が470~510m程度、横ずれ変位をしたと考えることができる(図6B)。高遊原溶岩流下直後の必従河川であることを踏まえれば、この変位量は高遊原溶岩の横ずれ変位量の最大値に近い値の可能性があり、大切畑の開析谷の屈曲をもとにした変位量とは矛盾しない。

3) 布田滝北の風隙地形

潮井神社の北東隣の谷口に流下する河谷(図6Bのr1)は、Aso-2火砕流堆積面のみを刻む特徴的な樹枝状水系模様をなす。その北東隣の河谷(図6Bのr2)は傾斜の異なる縦断形からなることと水系模様からr1の水系の一部を争奪した河川によって形成されたと考えられ、r1より相対的に新しい水系と考えられる。現在はr2の谷口よりも東に位置する布田滝が相対的に東へ移動することによってr1, r2の順に形成されたと考えるのが合理的であろう。布田滝の東への移動は、滝の後退か、布田川断層の横ずれあるいは、それらの複合が考えられるが、布田滝の下には高遊原溶岩が認められることや、布田滝の位置が高遊原溶岩の断層北西側近傍の西縁付近であることを考えると、滝の後退よりも布田川断層の横ずれによって滝が東へ移動したと考えた方が妥当であろう。

布田滝の北には、風隙地形(図6Bのw1, w2)が認められ、小谷に流下していた河川が現在の布田川に争奪されて形成されたと考えられる。これらの風隙の上流延長の位置を特定することは容易でないが、小谷への流下が地形的に明確に読み取れる風隙w2の方向からは、この上流は現在の布田川付近のように見える。すなわち、図6のaの谷中分水界を流れていた河川のうち、b付近が南流する河川に争奪されるのと前後して風隙w2を通して小谷に流下していた可能性がある。

高遊原溶岩の分布を見ると、溶岩堆積当時、Aso-2火砕流堆積面の北西には断層崖があり、これを埋めるように溶岩が堆積した可能性がある。この推定が正しければ、高遊原溶岩が流下した直後にはr1, r2のあるAso-2火砕流堆積面の北西には比高が小さいか、ほとんどない断層崖があり、Aso-2火砕流堆積面の侵食が強く抑制されていたと考えられる。その後、布田川断層に沿って谷頭侵食が進み、現在の布田滝のある位置に布田川が流れるようになってw1, w2が形成さ

れるとともに、布田川断層の横ずれによって断層の北西にあった高遊原溶岩台地が東に移動して断層崖の比高が大きくなり、Aso-2 火砕流堆積面の侵食が始まり、 r_1 , r_2 の順に形成されたと推定される。これらの推定を前提にすれば、 r_1 と w_1 との間の約 400m 程度の右横ずれが推定できる。古布田川河谷の横ずれ量よりも小さいが、必従河川の争奪後の変位量である可能性があることや、変位基準の不明確さを考えれば矛盾はない。

V. 高遊原溶岩から算定される変位速度と 2016 年の変位量との関係

上述のとおり、高遊原溶岩の横ずれ変位は 270 ~ 320m 以上で 470 ~ 510m 程度と考えられる。高遊原溶岩の流下は約 9 万年前とされており、それらに基づけば、過去 9 万年間の布田川断層の横ずれ平均変位速度は 5.2 ~ 5.7mm / 年となる。この変位速度は九州で最も大きく、我が国の活断層のなかで最大級である。地震前に布田川断層で推定されていた 0.2mm / 年（地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2013）の数十倍、地震後に調査した石村（2018）の 1.5 ~ 3.5mm / 年よりも大幅に大きい。

天然記念物に指定された堂園や潮井神社での 2016 年の変位は、上述のとおり、この地震断層としては最大級の 2m 程度である。古地震学的な調査からは布田川断層は、過去 1.5 万年間には、およそ 1000 ~ 2000 年に 1 度の間隔で間欠的に繰り返し活動してきたとされている（石村, 2018）。これらに基づけば、布田川断層の横ずれ変位速度は 1 ~ 2mm / 年程度の変位速度が算定され、本稿で推定した高遊原溶岩の横ずれに基づく変位速度に比べ、半分以下の値となる。このような変位速度と古地震の情報が不釣り合いな状況は知られていない。

2016 年の変位や古地震の繰り返し間隔、高遊原溶岩の横ずれのいずれも、複数の地点で求められており、2 倍や半分になるような誤差を含んでいないと考えられる。したがって、算出された変位速度の違いは、2016 年の変位がこれまでに比べ極端に小さかったか、算出される年代幅の違いによると考えるのが適当と考えられるが、古地震の変位量に大きな差は報告されていない。したがって、9 万年間の変位速度と、1.5 万年間の変位速度に違いがあることを示している可能性が高いと言えよう。このような数万年間で変位速度が異なる例は我が国では知られておらず、極めて特異で貴重な情報と考えられる。

九州や西日本で数万年間に歪み速度が変化したこと

は知られておらず、局地的な要因を考えるのが妥当である。9 万年間の変位速度は側火山の噴出物の横ずれをもとに検討しており、火山噴出直後は断層周辺の温度や歪みの状態がその後と異なっていた可能性があり、それによって変位量や活動間隔あるいは、断層の活動様態そのものが現在と異なっていた可能性があると考えられる。

火山周辺で算出される変位速度の扱いや、変位速度を求める期間の時間的な違いを考慮した扱いが必要であり、ひいては活断層の危険度評価にも考慮が必要と考える。

VI. 結びに

2016 年熊本地震に伴って生じた地表地震断層のうち、天然記念物に指定された場所付近の地形と、その変動地形学的な位置づけを詳細に記述した。大地震を引き起した地表地震断層は明治以降でもわずかしか出現しておらず、そのうち天然記念物として保存されている断層は 6 例しかない。地震の発生を伝える極めて貴重な地物であり、地震防災や地形地質の発達を考える上で重要な対象である。本稿がその理解の助けとなれば幸いである。

本稿ではさらに、天然記念物として保存された地震断層周辺の長期的な変位速度の算定を試み、これまでに推定されてきた変位速度よりも大幅に大きな値が推定できることを記述した。また、古地震から推定される過去 1.5 万年間の変位速度と 9 万年間の変位速度にも大きな齟齬があることを報告した。側火山の火山噴出直後は断層周辺の温度や歪みの状態がその後と異なっていた可能性を指摘した。火山周辺で算出される変位速度の扱いや、変位速度を求める期間の時間的な違いを考慮した扱いが必要であることを示している。今後、火山活動と周辺の活断層の活動の関係について他の地域でも検討を続けることが必要であると考えられる。

【謝辞】

広島大学大学院の熊原康博准教授からは地表地震断層の写真を提供いただき、同大学院学生の岩佐佳哉氏には iPad Pro での地形データ取得に関し、貴重な助言をいただいた。国土地理院から地震後の航空レーザ計測の提供を受けた。本研究に科学研究費補助金（18H03601）の一部を使用した。記して御礼申し上げます。

【文献】

- 安藤喜美子 (1972) : 三浦半島・伊豆半島および兵庫県山崎付近における断層の横ずれによる谷の変位量について. 地理学評論, 45, 716 ~ 725.
- 石村大輔 (2019) : 熊本県西原村布田における布田川断層の2016年熊本地震 (Mw7.0) 時上下変位と活動性. 活断層研究, 50, 33 ~ 44.
- 岩佐佳哉・熊原康博・後藤秀昭・中田高 (2020) : 熊本県益城町堂園地区における2016年熊本地震の地表地震断層の詳細な分布と共役断層の活動履歴. 活断層研究, 52, 1 ~ 8.
- 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.
- 熊原康博・岡田真介・楳原京子・金田平太郎・後藤秀昭・堤浩之 (2017) : 1:25,000 都市圏活断層図「熊本 (改訂版)」, 国土地理院.
- 小林哲夫・星住英夫 (2017) : 阿蘇4火砕流堆積物と高遊原溶岩が重なる露頭. 日本火山学会2017年度秋季大会講演予稿集, 127.
- 今野明咲香・遠田晋次 (2018) : 2016年熊本地震における地表地震断層と活断層の離隔距離の定量的検討 - 変位センスに着目して -. 日本地球惑星科学連合2018年大会, SSS08-P21.
- 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, 2021年8月7日参照.
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2016) : 平成28年 (2016年) 熊本地震の評価, https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2016/2016_kumamoto_3.pdf, 2021年8月24日参照.
- 鈴木康弘・石村大輔・熊本洋太・熊原康博・千田昇・中田高・中埜貴元 (2017) 1: 25,000 都市圏活断層図「阿蘇」, 国土地理院.
- 中田高・今泉俊文編 (2002) : 「活断層詳細デジタルマップ」東京大学出版会.
- 中田高・岡田篤正編 (1999) : 「野島断層 (写真と解説) - 兵庫県南部地震の地震断層 -」東京大学出版会.
- 内閣府 (2010) : 「平成22年度版防災白書」
- 山口勝 (2018) : 8K空撮の活断層研究への活用, 特に熊本地震における地震断層の発見について. 活断層研究, 48, 1 ~ 11.
- 渡辺一徳・小野晃司 (1969) : 阿蘇カルデラ西側, 大峰付近の地質. 地質学雑誌, 75, 365 ~ 374.
- 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*, 68, 26. doi: <https://doi.org/10.1186/s40623-017-0603-9>
- Koto, B. (1893): On the cause of the great earthquake in central Japan, *J. Coll. of Sci. Imp. Univ. Tokyo*, 5, 295-353.
- 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*, 68, 191. doi: <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0559-1>
- Sugito, N., Goto, H., Kumahara, Y., Tsutsumi, H., Nakata, T., Kagohara, K., Matsuta, N., and Yoshida, Y. (2016): Surface fault ruptures associated with the 14 April foreshock (Mj 6.5) of the 2016 Kumamoto earthquake sequence, southwest Japan, *Earth, Planets and Space*, 68, 170. doi: <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0559-1>
- Sugito, N., Goto, H., Kumahara, Y., Tsutsumi, H., Nakata, T., Kagohara, K., Matsuta, N., and Watanabe, M. (inpress): Chapter 18 Surface rupture accompanied with the largest foreshock. Kumahara, Y., Kaneda, H., and Tsutsumi, H. eds. : *Surface Ruptures Associated with the 2016 Kumamoto, Southwest Japan, Earthquake: Detailed Description and Related Tectonic Geomorphology*, Springer. (2021年8月31日受付)
- (2021年11月26日受理)