フィッション・トラック熱年代解析および U–Pb 年代測定に基づいた南九州せん断帯に分布する破砕帯の活動時期

Dating of a fault zone distributed in the South Kyushu shear zone based on fission-track thermochronology and U–Pb dating

Abstract

末岡 茂¹ 島田耕史¹ 照沢秀司²
岩野英樹³ 檀原 徹³ 小北康弘¹
平田岳史⁴

Shigeru Sueoka¹, Koji Shimada¹,
Shuji Terusawa² Hideki Iwano³
Tohru Danhara³ Yasuhiro Ogita¹ and
Takafumi Hirata⁴

2020年4月22日受付.

2020年10月26日受理.

¹ 日本原子力研究開発機構東濃地科学センター
Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency, Toki, Gifu 509-5102, Japan

² 応用地質株式会社

OYO Co., Ltd., Saitama 331-8688, Japan

³ 株式会社京都フィッション・トラック
Kyoto Fission-Track Co., Ltd., Kyoto 603-8832, Japan

⁴ 東京大学大学院理学系研究科地殻科学実験施設
Geochemical Research Center, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

Corresponding author: S. Sueoka,
sueoka.shigeru@jaea.go.jp

Fission-track (FT) and U–Pb thermochronometries were applied to rock samples collected from the South Kyushu shear zone for constraining when the zone was active its timing of activity. Two samples were collected from thermally undisturbed portions of the Shibi-san Granodiorite, and one sample was collected along an aplite dike which was cut by a fault zone. The samples yield zircon U–Pb ages of 14.0–13.5 Ma, zircon FT ages of 14.7–13.7 Ma, and apatite FT ages of 12.6–10.0 Ma. were obtained from the three samples. The ages and thermal inversion results show that the Shibi-san Granodiorite intruded into a relatively shallow depth at 14.0–13.5 Ma and cooled below the partial annealing zone of the apatite FT system (60–130°C) within a few million years. The Hirabae and Kusubae rock types of the Shibi-san Granodiorite have similar formation ages and cooling histories. Based on meso-microscopic observations of various directions of sense of shear in the fault zone, the aplite dike was displaced multiple times during and immediately after its intrusion, at temperatures of more than ~200°C. Apatite FT data show that dike intrusion and the series of fault movements occurred at 10.0 ± 0.8 Ma. The fault movements seem to be related to multiple tectonic movements at ca. 10 Ma, rather than to fracturing during the later stage of intrusion and cooling of the Shibi-san Granodiorite body at 14.0–13.5 Ma. Applying a similar approach to the study of further minor faults may provide more detailed understanding of the tectonics of the shear zone over geologic time.

Keywords: fission-track thermochronology, U–Pb dating, fault dating, South Kyushu shear zone, Shibi-san Granodiorite

はじめに

従来、地殻浅部のひずみは地形的に明瞭な長大活断層の活動によって主に解消されると考えられてきたが、近年、全球測位衛星システム (Global Navigation Satellite System; GNSS) 観測や小断層解析等に基づいた検討より、跡津川地域や山陰地域など、明瞭な変動地形を伴わずに数 mm/yr を超える速度でひずみが解消されている地域の存在が明らかになっており (例えば, Ohzono et al., 2011; Nishimura and Takada, 2017; Tamura et al., 2020), 地殻浅部におけるひずみの蓄積・解放プロセスの更なる理解が課題となっている。しかし、このような地形的に不明瞭なせん断帯では、空中写真判読やトレンチ調査法等の変動地形学的手法による活動時期や活動性の評価が制限されることが、GNSS による短期間の観測結果と地形学・地質学的に予測される地殻変動像との比較・検証を困難にする一因となっている。した

がって、このようなせん断帯の活動性や活動メカニズムの解明のためには、より多様な断層活動性評価手法の整備が求められる。

九州南部の熊本～鹿児島県境から宮崎～鹿児島県境にかけての地域は、GNSS 観測や発震機構の解析により、速いひずみ速度を有することが知られ (Takayama and Yoshida, 2007; Wallece et al., 2009; Matsumoto et al., 2015; Nishimura et al., 2018), 南九州せん断帯と呼称されている (Fig. 1a)。近年行われた稠密 GNSS 観測によると、熊本県球磨郡から鹿児島日置市にかけての南北約 100 km の地域では、固着域下限において 12–14 mm/yr 程度の左横ずれが推定されている (Watanabe and Asamori, 2019)。また、1997 年 3 月の鹿児島県北西部地震 (Mj6.6) は本せん断帯の西半部で発生しているが (Fig. 1b), 余震が東西方向に長さ約 15 km にわたって分布していることと発震機構から、東西方向の左横ずれ型の断層運動による地震と推定されてい

Fig. 1. a) Index map of the study area showing the approximate trend of the South Kyushu shear zone (SKSZ), after Wallace et al. (2009). b) Large-scale map of the study area. The focal mechanisms are from the CMT data of [URL3]. c) Geological map (after Wakita et al., 2009) showing sample localities. The boundary of the Hirabae and Kusubae rock types is modified from Yamamoto et al. (1988). Shaded relief maps were drawn using the Generic Mapping Tools (GMT; Wessel and Smith, 1991) and 50 m and 10 m digital elevation models of the Geospatial Information Authority of Japan (GSI). *1 = hypocenter data of [URL3], *2 = Committee for Catalog of Quaternary Volcanoes in Japan (1999), *3 = Nakata and Imai-zumi (2002).

る[URL1] (鹿児島大学理学部, 1997)。

一方で、このような左横ずれを示す明瞭な活構造は、本せん断帯周辺では地形的には認定されていない(例えば、九州活構造研究会, 1989; 中田・今泉, 2002) (Fig. 1b)。本せん断帯の北西側には、明瞭な活構造として出水断層帯が分布しているが、右横ずれ変位を伴う南東側隆起の正断層である[URL2]。鹿児島県北西部地震の際にも、鬼界アカホヤ火山灰降灰(7,253 ± 46 cal BP; Albert et al., 2019)以降に動いた可能性がある小断層が余震域内で報告されているものの(向吉ほか, 2018)、明瞭な地震断層は発見されていない。加

えて、鹿児島県北西部地震を引き起こした断層活動は、基盤である四万十帯に見られる屈曲構造(北薩屈曲; 橋本, 1962)を促進する方向ではあるが、少なくとも地表で見る限りは紫尾山花崗閃緑岩体貫入前の主要な屈曲構造には地質図スケールの影響を与えていない(村田, 1999)。以上のように、南九州せん断帯では明瞭な変動地形を欠くため、変動地形学的手法による活動性評価は困難であり、活動の開始時期やメカニズム等に関する知見は限られている。

本研究では、紫尾山花崗閃緑岩の露頭で観察された破碎帯がアプライト脈を変位させていることに着目して、熱年代学

の手法を用いて破碎帯の活動時期の制約を試みた。対象とした破碎帯は、アプライト脈を変位させていることから、アプライト脈の貫入以降に活動したことが明らかである。そこで、フィッション・トラック(FT)熱年代解析により、アプライト脈に接する紫尾山花崗閃緑岩が被熱した時期、すなわちアプライト脈の貫入時期を推定することで、破碎帯の活動時期の制約を試みた。またその過程で、アプライト脈の貫入による熱異常を正確に評価するため、アプライト脈による被熱を受けていない試料を用いて、紫尾山花崗閃緑岩の一般的な冷却史の推定も行った。

地形・地質概要

1. 紫尾山花崗閃緑岩

紫尾山花崗閃緑岩体は、熊本～鹿児島県境に分布する南北約 11 km、東西約 4 km の深成岩体で、四万十帯の堆積岩類に貫入している (Fig. 1c)。岩体は全体として花崗閃緑岩～花崗岩からなるが、岩型の違いから北半部の平八重型と南半部の楠八重型に分けられている (大庭, 1957; 山本ほか, 1988)。平八重型は、中～細粒の普通角閃石含有黒雲母花崗閃緑岩～黒雲母花崗閃緑岩からなり、主成分鉱物として斜長石、カリ長石、石英、黒雲母、副成分鉱物として普通角閃石、単斜輝石、ザクロ石、カミングトン閃石、アクチノ閃石、ジルコン、アパタイト、チタン鉄鉱、磁硫鉄鉱などを含む。楠八重型は、中粒の普通角閃石～黒雲母花崗閃緑岩～黒雲母花崗岩からなり、主成分鉱物として斜長石、カリ長石、石英、黒雲母、普通角閃石、副成分鉱物として単斜輝石、ザクロ石、カミングトン閃石、アクチノ閃石、ジルコン、アパタイト、チタン鉄鉱、磁硫鉄鉱などを含む (山本ほか, 1988)。両岩型の間には互いに漸移的である (山本ほか, 1988)。

紫尾山花崗閃緑岩体の詳細な形成年代や冷却史は不明だが、複数の放射年代測定法により中期中新世の年代値が報告されている。黒雲母 K-Ar 年代としては、詳細な試料採取地点は示されていないが、中粒黒雲母アダメロ岩から 13.6 Ma (河野・植田, 1966)、楠八重～堀切間の道路沿いで採取された斑状の正長石～普通角閃石～黒雲母花崗閃緑岩から 15 ± 4 Ma (Miller et al., 1962; Shibata and Nozawa, 1967) の年代が得られている。またジルコン FT 年代としては、楠八重型の岩型では、鹿児島県宮ノ城町 (現・さつま町宮之城地区) の久木野 ($31^{\circ}56'57''\text{N}$, $130^{\circ}21'49''\text{E}$) で 12.7 ± 1.2 Ma、楠八重 ($31^{\circ}56'28''\text{N}$, $130^{\circ}22'15''\text{E}$) で 12.3 ± 1.0 Ma の値が報告されている (Miyachi, 1985; 宮地, 1995)。

2. 破碎帯の性状

2.1 露頭観察に基づく破碎帯の性状 本研究で破碎帯を確認した露頭は、鹿児島県薩摩郡さつま町の泊野川沿いにあり、向吉ほか (2018) が断層露頭を報告した地点の約 1 km 南方に位置する (Fig. 1 の SB101)。南流する泊野川右岸に、花崗閃緑岩、これに貫入するアプライト岩脈、さらに後生的な方解石脈がみられ、これらを起源とする破碎帯がみられる (Fig. 2a, b)。1 条の主断層とその周囲幅 50 cm 程度以下で連続的な面構造発達ゾーン (後述する面状カタクレサイトおよび未固結断層岩の分布域)、および派生する面構造発達

ゾーンが見られ、露頭で確認できる延長は 2.5 m 程度である。主断層上端は、円礫～亜円礫を含む砂礫層に覆われている。FT 年代測定試料採取地点は Fig. 2b, c に★印で示す箇所、主断層から約 1 m 離れた非変形部である。露頭の凹凸形状とスケッチ方向の関係から、アプライト岩脈 (スケッチの黒色脈状部) は、Fig. 2b では★印部で途切れるように見えるが、Fig. 2c (スケッチ方向と斜交して撮影) に示すように連続しており、岩脈の走向傾斜は $\text{N}3^{\circ}\text{E}68^{\circ}\text{W}$ である。

主断層は、幅 10 cm 以下で膨縮し灰色～灰緑色を呈する断層ガウジ帯中に、幅数 mm でゆるやかに湾曲しながら連続的に発達する断層ガウジ層として認められる。露頭の上部～中部では走向 $\text{N}60^{\circ}\text{W}$ 前後で北傾斜 70° 程度、露頭下部では北傾斜 60° 程度である。その周囲には最大幅 20 cm 以下の未固結断層岩 (数 cm 厚のレンズ状断層角礫とこれを取り囲む網目状の断層ガウジが発達する部分) がみられ、フラグメントの配列および断層ガウジの色調差によって規定される面構造が発達している。未固結断層岩のフラグメントには花崗閃緑岩起源、アプライト岩脈起源、鏡下では方解石脈起源のものが認められる。未固結断層岩の下盤側には花崗閃緑岩中の黒雲母の伸長、数 mm 間隔以下で平行～亜平行に発達する細密破断面、細密破断面沿いに部分的に発達する粘土薄層、およびこれらの湾曲や網目状分布により規定される面構造が発達する面状カタクレサイトが幅 30 cm 以下で連続的に分布している。さらに、この連続的な部分から下盤側南東方向に派生する面状カタクレサイト帯がみられる。面状カタクレサイト帯には、周囲が面状カタクレサイトに遷移する長径数 10 cm 以下の非変形花崗閃緑岩・アプライトブロックが包含される部分や、断層ガウジ薄層がみられる部分がある。以上のように、アプライト脈および方解石脈が、花崗閃緑岩とともに破碎帯の活動により変形した様子が随所で観察でき、断層活動はアプライト岩脈の貫入以降に生じている。

破碎帯に見られる複合面構造 (Fig. 2d, f に示す P 面、Y 面、 R_1 面の組み合わせ) や断層面上のコメット状の条線などの運動学的指標からは、アプライト岩脈貫入以降の右ずれセンス (Fig. 2d)、左ずれセンス (Fig. 2f) や、正断層センス (Fig. 2e) が確認できる。また、2 方向の条線が発達する場合、低角度の条線が高角度の条線に削られている様子が見られることがあり、その場では相対的新期に傾斜成分の大きな正断層に近い運動 (以下、正断層運動) が生じたと判断される。

2.2 岩石薄片観察に基づく破碎帯の性状 2 方向の条線が発達する Fig. 2 の point (B) から採取した定方位試料から、面構造に垂直で相対的古期の東に沈下する条線に平行な薄片 (以下、横ずれ運動確認用薄片; Fig. A1) と、同じく新期の北北西に沈下する条線に平行な薄片 (以下、正断層運動確認用薄片; Fig. A2) を作成した。横ずれ運動確認用薄片では、厚さ 1.5 cm 未満のアプライト岩脈起源の層 (AP) が長さ 6 cm 以上にわたって連続し、内部はカタクレシスを被っている。また、花崗閃緑岩の岩片 (GD) はレンズ状の形態を呈し、その伸びの方向は P 面を規定する (Fig. A1a)。アプラ

Fig. 2. (a) Photograph of the fault zone outcrop, and (b) associated sketch showing fault zone details and (c–f) inset boxes of the close-up views of the crush zone and sample localities. The main fault is a thin (mm scale) and slightly wavy fault gouge layer, oriented about N60°W 70°–60°N, running through foliated incohesive fault rocks of <20 cm thick (composed mainly of fault gouge) beneath the hanging wall of the granodiorite. A continuous foliated cataclasite zone of <30 cm thick is distributed along the footwall of the incohesive zone, with discontinuous splays of cataclasite branching off from the main zone. The cataclasite and incohesive fault rocks are derived from aplite dike rock and host granodiorite. Sample SB101 is from undeformed granodiorite hosting aplite, marked with star symbols in (b) and (c), about 1 m from the main fault. Composite planar fabrics (combinations of P, R₁ or Y plane) as shear sense indicators are shown in (d) and (f). Older dextral (d) and sinistral (f) sense of shear and younger normal-slip (e) sense of shear are depicted by shear sense indicators shown in (d–f). Deformed aplite lenses or fragments (white colored or labeled Ap in (d)) indicate that the intrusion of the aplite preceded shear deformations. Scattered orientations of plunge and azimuth of striations (indicated in italics with parentheses and a small arrow in each strike and dip symbol) indicate a varying sense of shear, and suggest a complex deformation history.

Fig. 2. Continued.

イト岩脈起源の層(以下, アプライト層)内では, カタクラスティックに細粒化した基質(Cat_m)中に, 方解石脈を含むアプライトの岩片が認められる(Fig. A1b)。また, 塑性変形した黒雲母と細粒化したカタクレサイトレンズの伸長方向で規定される P 面および P 面の湾曲が収れんしていく Y 面が認められ(Fig. A1c), この面状カタクレサイト形成時のせん断センスは右ずれである。薄片全体的に認められる右ずれの変形構造に局所的に重複して, 黒雲母の塑性変形を伴う左ずれを示す面状カタクレサイトが認められる(Fig. A1d)。したがって, 横ずれ運動の形成順序は先行する右ずれの後に左ずれが重複したと考えられる。

一方, 正断層運動確認用薄片では, アプライト層は連続性が悪く, P-R₁ ファブリックを呈しながら分離している(Fig. A2a)。アプライト層の下盤側には幅 1 cm 程度の細粒化の進んだ主すべり帯(Fig. A2a の PSZ)が認められ, PSZ 上盤側に一部途切れるが最も連続性の良い主すべり面(Fig. A2a の PSS)が発達している。PSZ の内部と PSS 沿いに正断層センスを示す黒雲母フィッシュ(黒雲母の塑性変形)が見られる(Fig. A2b-e)。

黒雲母の塑性変形は 250°C 以上で生じるとされ(Passchier and Trouw, 2005), Kato et al.(2003)は, 黒雲母の

へき開面のせん断方向への明瞭な湾曲(引きずり変形)を, 実験温度が 180°C であった試料に認めている。したがって, 右ずれ, 左ずれ, 正断層運動の順序で生じた黒雲母の塑性変形を伴う変形構造は, 200°C 程度以上の変形温度条件を示す。すなわち, これらの一連の変形は, 200°C 程度以上の高温環境下で生じたと考えられる。

分析手順

1. 試料採取

本研究では, 熱年代解析に供する岩石試料を計 3 点採取した。まず, 紫尾山花崗閃緑岩体の広域的な冷却史の推定を目的として, 楠八重型と平八重型から熱年代解析用の試料を 1 点ずつ採取した。楠八重型の試料(SBGr-S1)は, 鹿児島県薩摩郡さつま町の泊野川にある轟の滝の左岸側で採取した。採取位置は, ハンディ GPS の読み取り値(WGS84)で, 北緯 31°57'8.66", 東経 130°21'29.33", 標高 261 m である(Fig. 1)。平八重型の試料(SBGr-N2)は, 鹿児島県出水市の土石採掘場から北方に約 100 m の道路沿いで採取した。採取位置は, ハンディ GPS の読み取り値(WGS84)で, 北緯 31°59'19.48", 東経 130°20'28.88", 標高 496 m である(Fig. 1)。露頭全体としては風化が著しくほぼ真砂化してい

Table 1. Operating parameters of LA-ICP-MS from *1 = Wiedenbeck et al. (1995) *2 = Iwano et al. (2012), *3 = Iwano et al. (2013b), *4 = Lukács et al. (2015), *5 = Sláma et al. (2008), *6 = Jackson et al. (2004), and *7 = Danhara and Iwano (2013).

Laser ablation	
Model	Light Conversion Carbide
Laser type	Femtosecond laser
Pulse width	224 fs
Wave length	260 nm
Laser power	40% (ZFT&U-Pb) 45% (AFT)
Energy density	1.6 J/cm ² (ZFT&U-Pb) 2.6 J/cm ² (AFT)
Spot size	10 µm
Sampling mode	Multi-spot (galvano mirror system used)
Repetition rate	100 Hz
Laser ablated area	30 µm x 30 µm (ZFT&U-Pb) 35 µm x 35 µm (AFT)
Duration of laser ablation	10 s
Carrier gas (He)	0.60 or 0.75 L/min
ICP-MS	
Model	Thermo Fisher Scientific iCAP TM TQ ICP-MS
ICP-MS type	Triple quadrupole
Operation mode	Single quadrupole (SQ) mode
Interference removal	KED mode (He gas flow: 4 mL/min)
RF power	1550 W
Make-up gas (Ar)	0.95 L/min
ThO ⁺ /Th (oxide ratio)	<1%
Data acquisition protocol	Time-resolved analysis
Data acquisition	25 s (15 s gas blank, 10 s ablation)
Monitor isotopes	²⁹ Si (ZFT&U-Pb), ⁴³ Ca (AFT), ²⁰² Hg, ²⁰⁴ Pb, ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb, ²⁰⁸ Pb, ²³² Th, ²³⁸ U
Dwell time	0.2 s for ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb, 0.1 s for others
Standards	
Primary standard (U-Pb)	Nancy 91500 *1
Secondary standard (U-Pb)	OD-3 *2-4, Plešovice *5, GJ-1 *6
Primary standards (ZFT)	Fish Canyon Tuff *7, Buluk Member Tuff *7
Primary standards (AFT)	Durango Apatite *7
Secondary standard (AFT)	Fish Canyon Tuff *7

たため、風化核の堅岩部を採取した。

加えて、小断層沿いに変位を受けているアパタイト脈周辺の花崗閃緑岩を1点採取した(SB101) (Fig. 2)。これにより、アパタイト脈の貫入時期を推定し、小断層の活動時期の上限を制約する目的である。経験的に、岩脈の熱によりアパタイト FT 年代が若返るのは、岩脈の幅と同じオーダーの距離内に限られることが多い(例えば、松崎ほか, 2004; Sueoka et al., 2017)。アパタイト脈から2 cm 以内の部分だけ切り出して熱年代解析に用いた。採取位置は、ハンディ GPS の読み取り値(WGS84)で、北緯 31°58'04.09", 東経 130°21'07.48", 標高 488 m である。

2. フィッション・トラック解析および U-Pb 年代測定

FT 解析は、株式会社京都フィッション・トラックで実施した。鉱物分離は、磁石と重液を用いた一般的な方法により行った。精選した鉱物粒子は、アパタイトはエポキシ樹脂、ジルコンは PFA テフロンシートに埋め込んだのち、結晶内部面(4π 面)が露出するまで研磨した。アパタイトは 21 ± 1°C の 5.5 M 硝酸溶液中で 20.0 ± 0.5 秒(Donelick et al., 2005)、ジルコンは 225°C の KOH-NaOH 等モル共融液中で、結晶 c 軸平行方向のトラックが十分に可視化されるまで 30 時間エッチングした。本研究試料のアパタイトはいず

れも自発 FT 密度が低く、FT 長測定に適した confined track の取得が困難と予想されたため、FT 長測定用のアパタイト試料にはエッチング前に ²⁵²Cf 片による照射を施し confined track の増量を試みた(Donelick and Miller, 1991)。FT の観察および測定は、光学顕微鏡(Nikon Eclipse E1000)に高解像度デジタルカメラ(Hamamatsu digital camera Model C9440-05G)と高品位モニター(Touch Panel Systems 17-inch LCD TouchMonitor)を装着した測定システム(観察倍率 2,550 倍)で行った(Danhara and Iwano, 2009)。

ウラン濃度の測定は、東京大学地殻化学実験施設の LA-ICP-MS を用いて行った(Hattori et al., 2017; Obayashi et al., 2017; Makino et al., 2019; Iwano et al., 2019, 2020)。なお、ジルコンの分析時には同時に鉛同位体も定量し、FT 年代と U-Pb 年代の同時測定(Hasebe et al., 2013; Iwano et al., 2013b, 2018)を行った。測定条件の概要は Table 1 に示した通りである。²³⁸U のシグナルは、ジルコンでは ²⁹Si、アパタイトでは ⁴³Ca を内標準として標準化した(Hasebe et al., 2009)。また、外標準として、平均ウラン濃度 84 ppm の Nancy 91500 ジルコン片、または平均ウラン濃度 14 ppm の Durango アパタイト片を測定し、²³⁸U

Fig. 3. Concordia diagrams of U-Pb isotope data for the studied samples. Data-point error ellipses are 2σ . Diagrams were created using Isoplot ver. 4.15 (Ludwig, 2012).

の絶対濃度に換算した。ジルコン U-Pb 年代の算出に際しては、中新世より若い年代が予想されたため、U-Th-Pb 放射壊変の放射非平衡の補正 (Sakata et al., 2017) を行った。

なお、FT 年代測定に当たっては、 χ^2 検定 (Galbraith, 1981) を用いて粒子年代のばらつきを評価するのが慣例となっているが、本研究では適用しなかった。これは、LA-ICP-MS を用いてウラン濃度測定を行ったため、FT 密度の計数領域とウラン濃度の測定領域が完全には一致せず、それが非ポアソン要因となり得るためである。FT 年代および

FT 長を測定したアパタイト粒子は、アニーリング速度の不均質の評価のため Cl 濃度および D_{par} (表面トラックの結晶 c 軸方向の直径) を測定した (例えば, Carlson et al., 1999)。Cl 濃度の測定は、日本原子力研究開発機構東濃地科学センターの電界放出型電子プローブマイクロアナライザ (JEOL JXA-8530F; Shimizu et al., 2017) を用いて実施した。 D_{par} については、FT 長測定と同じ要領で、京都フィッシュン・トラックで測定した。

Table 2. Summary of FT parameters. ρ_s = density of spontaneous tracks, N_s = number of spontaneous tracks, ρ_U = density of counted uranium, N_U = number of counted uranium, ρ_{U-std} = density of counted uranium of standard, N_{U-std} = number of counted uranium of standard, U = uranium content, and D_{par} = mean FT etch figure diameter parallel to the crystallographic c -axis (correlated to the annealing rate of apatite FTs; e.g., Carlson et al., 1999). FT ages (t) and their errors (σ) are calculated by the following equations where λ_D is the total decay constant of ^{238}U ($1.55125 \times 10^{-10} \text{ yr}^{-1}$), g is the geometry factor (0.5 for internal surfaces), and σ_t is error of ζ value. Reference age of the Buluk Member tuff is $16.2 \pm 0.6 \text{ Ma}$ ($\pm 2\sigma$; Hurford and Watkins, 1987).

Sample code	Rock type	grains	Spontaneous FT		U measurement		U standard		U [ppm]	$\zeta \pm 1\sigma$ [cm ² /yr]	D _{par} [μm]	Cl [wt%]	FT age ± 1σ [Ma]	U-Pb age ± 2σ [Ma]
			ρ _s [10 ⁶ cm ⁻²]	N _s	ρ _U [10 ¹⁰ cm ⁻²]	N _U	ρ _{U-std} [10 ⁹ cm ⁻²]	N _{U-std}						
Unknown														
Zircon														
SBGr-S1	Kusubae	33	3.21	2,163	4.30	28,395,749	8.647	77,820	417.7	44.7 ± 1.8	-	-	14.7 ± 0.7	14.0 ± 0.2
SBGr-N2	Hirabae	33	3.69	2,182	5.32	30,718,308	8.647	77,820	517.1	44.7 ± 1.8	-	-	13.7 ± 0.6	13.5 ± 0.2
SB101	Kusubae	30	2.88	1,812	2.35	14,803,922	5.027	45,247	393.3	45.2 ± 1.9	-	-	13.9 ± 0.7	13.9 ± 0.4
Apatite														
SBGr-S1	Kusubae	30	0.29	259	1.40	11,733,910	4.394	53,830	44.6	251 ± 14	1.71	0.293	12.1 ± 1.0	-
SBGr-N2	Hirabae	30	0.19	172	0.90	7,528,761	4.394	53,830	28.7	251 ± 14	1.58	0.273	12.6 ± 1.2	-
SB101	Kusubae	30	0.43	428	2.57	23,476,061	4.394	53,830	81.9	251 ± 14	1.56	0.260	10.0 ± 0.8	-
Age standard														
Zircon														
Buluk Member tuff		30	1.03	725	1.15	8,047,690	8.499	76,494	113.8	44.7 ± 1.8	-	-	17.1 ± 1.9	-
Buluk Member tuff		19	1.23	423	0.77	2,640,677	5.027	45,247	128.6	45.2 ± 1.9	-	-	18.2 ± 2.4	-

分析結果

1. U-Pb 年代測定の結果

U-Pb 年代測定の結果を Fig. 3 に示す. SBGr-S1 は, 測定した全 33 粒子のうち 28 粒子がコンコードントと判定された. そのうち, 74.5 Ma の年代を示す 1 粒子を除いた 27 粒子は 14.8~13.1 Ma の狭い範囲に集中したため, これらの加重平均値である 14.0 ± 0.2 Ma を採用した (Table 2). SBGr-N2 は, 全 33 粒子中 30 粒子がコンコードントと判定され, 15.4~12.0 Ma のままとりの良い年代集団を形成した. これらの加重平均値から, 13.5 ± 0.2 Ma を採用した. SB101 では, 全 30 粒子中, コンコードントと判定された粒子は 10 粒子と少数であった. これらの粒子は 15.8~13.0 Ma と単一の年代集団を形成したため, これらの加重平均値である 13.9 ± 0.4 Ma を採用した.

2. フィッシュン・トラック解析の結果

FT 年代測定の結果を Table 2 に, FT 長解析の結果を Fig. 4 に示す. 二次スタンダードの pooled FT 年代(例えば, Donelick et al., 2005; Hasebe et al., 2013)は, 最尤推定値では文献値(16.2 ± 0.2 Ma; Hurford and Watkins, 1987)より 1~2 Ma 程度古いものの, 誤差 1σ の範囲では重なっている. したがって, 本研究で得られた FT 年代は, 誤差 1σ の範囲で信頼できる結果だと判断できる.

ジルコン FT 年代は pooled 年代で 14.7~13.7 Ma を示し, 3 試料とも誤差 1σ の範囲で重なった. また, いずれの試料もジルコン U-Pb 年代と誤差 1σ で重なっている (Table 2). ジルコン FT 長は, 平均では 10.95~11.21 μm で, いずれの試料も初期長(約 11 μm ; Yamada et al., 1995)と比較して有意な短縮を受けていない. また, 幅の狭い単峰性の分布を共通して示した (Fig. 4). 以上の結果から, いずれの試料も約数 10 万年以内の短期間に, ジルコン U-Pb 法の閉鎖温度($>900^\circ\text{C}$; Cherniak and Watson, 2000)付近からジルコン FT 法の部分安定領域(partial annealing zone (PAZ); Yamada et al. (2007) の fanning-linear モデルでは $260\sim 350^\circ\text{C}$)以下まで, 急速な急冷を受けたと判断できる. これは既往の黒雲母 K-Ar 年代 (Miller et al., 1962; 河野・植田, 1966; Shibata and Nozawa, 1967) およびジルコン FT 年代 (Miyachi, 1985; 宮地, 1995) の結果とも整合的である.

アパタイト FT 年代は pooled 年代で 12.6~10.0 Ma で, 同じ試料のジルコン FT 法より 1.1~3.9 Myr ほど若い値を示し (Table 2), 両者の閉鎖温度の関係と矛盾しない. SB101 のアパタイト FT 年代のみは, 誤差 1σ の範囲では他の 2 試料のアパタイト FT 年代とは重ならなかった. アパタイトの FT 長は平均で 14.20~14.44 μm で, 初期長(約 16 μm ; Gleadow et al., 1986)と比較すると若干の短縮を受けている. FT 長の分布はいずれの試料も単峰性を示すが, SB101 では比較的幅の狭い分布を取るのに対して, SBGr-N2 では短い側に裾の長い分布を取るなど試料間で差が見られる (Fig. 4). 特に SB101 では, ほとんど短縮を被っていない 15 μm を超える FT の割合が多いことから, 他の 2 試

Fig. 4. FT length histograms of apatites and zircons from the study samples. For the zircons, tracks with azimuth angles higher (black) or lower (light gray) than 60° to the crystallographic c -axis are differentiated because FT lengths in zircon are dependent on etching and annealing properties that have angular variation (Hasebe et al., 1994; Yamada et al., 1995). Data for zircons with FTs greater than 60° to the crystallographic c -axis are listed first, followed by data computed from all the FTs measured in brackets, which are shown for reference. n = number of FTs measured, Ave = mean FT length, 1sd = standard deviation of the FT length, and 1se = standard error of the FT length.

料よりもアパタイト FT 法の PAZ ($60\sim 130^\circ\text{C}$) 付近に滞在した期間の割合が短いことが予想される. なお, アパタイトの Cl 濃度は $0.29\sim 0.26$ wt%, D_{par} の値は $1.56\sim 1.71$ $\mu\text{m}^2/\text{s}$ でどの試料も一様に低いため (cf. Donelick et al., 2005), アニリング速度の不均質に起因する試料間の年代値や FT 長の違いは無視できる.

考察

1. 紫尾山花崗閃緑岩体の貫入時期と冷却史

ジルコン U-Pb 法の閉鎖温度($>900^\circ\text{C}$; Cherniak and Watson, 2000) が花崗閃緑岩マグマよりも高温なことや, 本研究で得られたジルコン U-Pb 年代は FT を計数した内部面で測定しており粒子の最外殻を測定しているとは限らないことを考慮すると, 今回得られたジルコン U-Pb 年代は, 紫尾山花崗閃緑岩の貫入時期の上限を制約すると考えられる. 一方, ジルコン FT 年代と比較すると, いずれの試料でもジルコン U-Pb 年代と誤差 1σ の範囲で重なる (Table 2).

ジルコン FT 法はジルコン U–Pb 法に比べて閉鎖温度が約 600°C も低いいため、もしジルコン U–Pb 年代が貫入時期より有意に古ければ、両者の年代値が一致することは考え難い。したがって、これらのジルコン U–Pb 年代は紫尾山花崗閃緑岩体の貫入に対応していると解釈し、その時期を 14.0~13.5 Ma と推定した。

楠八重型 (SBGr-S1) と平八重型 (SBGr-N2) の年代を比較すると、ジルコン U–Pb 年代では楠八重型が 14.0~13.9 Ma に対して平八重型が 13.5 Ma、ジルコン FT 年代では楠八重型が 14.7~13.9 Ma に対して平八重型が 13.7 Ma と、楠八重型の方がわずかに古い値を示す (Table 2)。ただし、これらの年代値の多くは誤差 1 σ で重なっているため、有意な年代差があるとは言えない。両岩型の境界部が漸移的である (山本ほか, 1988) ことも併せて考えると、2 つの岩型は基本的には一連のマグマ活動によりほぼ同時期に形成されたものだと考えられる。一方で、アプライト脈の貫入に伴う再加熱を被っていない楠八重型と平八重型のジルコン U–Pb 年代で誤差 2 σ を超える差があること、ジルコン U–Pb 年代とジルコン FT 年代の両方で共通して楠八重型の方が古い点には注意が必要である。現時点ではジルコン U–Pb 年代の測定数が 3 試料と少ないため、本稿では可能性を提示するとともに、楠八重型と平八重型では数 10 万年程度の貫入時期の違いが存在する可能性は否定できない。

得られた熱年代データを基に、熱履歴の逆解析を行った結果を Fig. 5 に示す。解析の詳細については、付録 A を参照のこと。SBGr-S1 (Fig. 5a1) と SBGr-N2 (Fig. 5b1) は、前者の方がやや冷却速度は遅いものの 14~13 Ma 頃から急冷し、アパタイト FT 法の PAZ 付近から徐々に冷却速度を減じていくパターンが共通して推定された。この結果は、元の年代値から制約される大まかな冷却時期や、FT 長から予測される定性的な冷却速度とも矛盾しない。冷却速度が減少していくパターンは、岩体の貫入以降の初期冷却を反映していると考えられる (cf. Harrison and Clarke, 1979 の Figs. 1, 2)。以上の結果に従うと、紫尾山花崗閃緑岩体は、貫入直後の初期冷却で >900°C から 100°C 程度まで急冷を受けたことが推定される。当時の本地域が、仮に 20~30°C/km 程度の一般的な地温勾配を有していたならば、紫尾山花崗閃緑岩体は地下 3~5 km 程度の浅所に貫入したことになる。

2. 破碎帯の活動時期

一方、SB101 は、同じ楠八重型の SBGr-S1 と比較して、アパタイトの FT 年代が若く平均 FT 長が長い。したがって、岩体がいったん冷却した後生じた、再加熱イベントに伴う冷却年代を示すと考えられる。傍証として熱履歴解析により再加熱の有無を検討したところ、SB101 は単調冷却 (Fig. 5c1) より再加熱を仮定 (Fig. 5c2) した方が、より少ない試行回数で適合度の高い温度–時間パスを集めることができた (Table A1)。また、best-fit パスや weighted mean パスにみられるように、再加熱パターンを強調したパスで高い適合度が得られた。比較のため、SBGr-S1 でも同様に再加熱を仮定した解析を行ったが (Fig. 5a2)、適合度の高いパスの収集により多くの試行が必要となったうえ、アパタイト FT 年

Fig. 5. Thermal inversion modeling results of study samples. ZFT = zircon fission track, AFT = apatite fission track, PAZ = partial annealing zone, and GOF = goodness of fit. Note that thermal histories above 350°C, the upper limit of ZFT PAZ, are artificial and meaningless. Rapid cooling from >900°C to <350°C is assumed for all samples because their U–Pb and FT ages of zircon are coeval.

代の適合度が大幅に低下した (Table A1)。また、best-fit パスや weighted mean パスからは、再加熱パターンを最小化するパスの適合度が高かったことが推測された。以上のことから、SB101 は他の 2 試料と同様に 14~13 Ma 頃から岩体の初期冷却に伴い冷却されていたが、いったんアパタイト FT 法の PAZ 以下まで冷えた後、10 Ma 頃の再加熱により、アパタイト FT 年代がトータルアニーリングを被ったと考えられる。この再加熱イベントはアプライト脈の貫入によるものと考えられ、その時期はアパタイト FT 年代から 10.0 ± 0.8 Ma 頃と推定される。花崗岩中のアプライト脈は、マグマの残液が固結したという一般的な解釈 (例えば、久城ほか編, 1989) に対し、花崗岩と同一時期に固結していないものもあると言われている (例えば、加々美, 2005)。今回検討対象としたアプライト脈は後者の可能性がある。

さて、破碎帯は主すべり帯として未固結の断層ガウジを伴い、アプライト脈を脆性的に変位させているが、黒雲母の鏡

下で確認できる塑性変形に基づき、活動時の温度条件は約 200°C 以上である。SB101 の熱履歴解析の結果を見ると、約 10 Ma の最終冷却後は直ちに現在の地表温度付近まで冷却されていることから、この時点で紫尾山花崗閃緑岩体は地表付近の低温領域に存在していたと考えられる。したがって、黒雲母フィッシュの形成(塑性変形)に必要な熱が、局所的に破碎帯に供給される必要がある。このような熱源としては、アプライト岩脈の貫入やその後の方解石脈の沈殿をもたらした熱水が有力な候補となることから、一連の破碎帯の活動時期はアプライト岩脈の貫入直後の可能性が高い。以上のことから、破碎帯の活動時期は、アプライト脈が貫入してからアパタイト FT 法の PAZ 以下まで冷却するまでの間、すなわち 10.0 ± 0.8 Ma 頃の可能性が高い。このことは、本破碎帯の活動が、花崗閃緑岩体の貫入直後に生じるような初期冷却に伴う割れ目の形成とアプライト脈の貫入に引き続くせん断という、花崗岩マグマの貫入に引き続くイベントと考えるよりも、岩体が一度冷却した後に、破碎帯の局所的な加熱を伴うテクトニックな作用等で起こったものであることを支持する。なお、九州付近は、10 Ma 頃に、フィリピン海プレートの運動にともなって左横ずれ圧縮場に置かれていたとの説があり(例えば、Mahony et al., 2011)、本破碎帯の活動(北西走向で、右横ずれ、左横ずれ、正断層センスの順)は、これに関連したテクトニクスを反映している可能性がある。しかしながら、本地域周辺では 10 Ma 前後の応力場に関する資料はほとんど無く、今回の 1 地点の情報から議論を深めることはできない。

本破碎帯は、未固結の断層ガウジを伴うことから、活構造である可能性も考慮して検討を進めたが、その活動時期は古く、現世の南九州せん断帯の活動の一部を担うものという解釈は成り立たない。しかしながら、本研究により、上載地層法が適用できない小断層の露頭においても、貫入岩脈のような変位マーカーがあれば、活動時期の推定が可能であることが実証された。またそのためには、微小構造の観察による破碎帯の活動条件の復元と、熱年代による熱史の推定が有効なツールであることが示された。南九州せん断帯のような明瞭な変位地形に乏しい地域では、明瞭な断層変位が地表面ないし堆積層まで達することは希で、変位・変形は基盤岩中の構造として観察されることが増えると予想される。そのため、上載地層法を始めとした従来の変動地形学的手法のみならず、このような構造地質学や熱年代学などによる活動性評価も選択肢に入れるべきである。本破碎帯近傍に産し、本破碎帯と同程度の幅数 10 cm の面状カタクレサイトを伴う破碎帯(東西走向で左横ずれセンス; 向吉ほか, 2018, Fig. 4)の活動条件を顕微鏡スケールの微小構造観察から制約していくことや、本地域周辺に多く分布する花崗岩質の岩脈(山本・牛島, 1994)に対し、今回と同じような熱年代学的手法を適用して貫入年代を決定していくことで、破碎帯の活動性評価手法の発展が期待できる。さらに、現世の南九州せん断帯の発達に先行して形成された弱面としての破碎帯の活動史や岩脈の形成史の蓄積によって、本地域の広域的・長期的な構造発達史の理解が進むことが期待される。

結 論

南九州せん断帯に分布する破碎帯の活動時期を制約するため、紫尾山花崗閃緑岩体から採取した 3 試料について、FT 解析および U-Pb 年代測定、ならびにこれらに基づいた熱履歴解析を実施した。紫尾山花崗閃緑岩体は 14.0~13.5 Ma に浅所に貫入し、アパタイト FT 法の PAZ (60~130°C) 以下まで急冷されたと推定される。平八重型と楠八重型の岩型で、貫入時期と冷却史に大きな違いは見られず、両者は基本的には一連のマグマ活動でほぼ同時に形成された可能性が高い。本研究で対象とした破碎帯は、破碎帯の推定活動温度およびアプライト脈の推定貫入時期から、 10.0 ± 0.8 Ma 頃に活動したと推定される。この破碎帯の活動は、岩体の貫入および初期冷却に伴う膨張・収縮による破碎ではなく、岩体冷却後のテクトニックな作用に起因すると考えられる。本研究での事例により、破碎帯の構造観察と熱年代測定に基づいて、基盤岩中の小断層の活動性評価が可能ながことが実証された。今後、同様のデータを蓄積することで、南九州せん断帯の地質時間スケールを通じた広域的な構造運動像が明らかになっていくことが期待される。

付録 A : 熱履歴の逆解析の詳細

得られた熱年代データを基に、モンテカルロ法を用いた逆解析により、より詳細な熱履歴の推定を行った。計算には、HeFTy ver.1.9.3(Ketcham, 2005)を用いた。HeFTy は、ランダムに発生させた温度-時間パスに対して、アニーリング関数に従って年代値および FT 長分布の理論値を計算し、これらを実測値と比較・評価することにより、熱履歴を復元するプログラムである。

アニーリング関数は、アパタイト FT 法では Ketcham et al.(2007a)を、ジルコン FT 法では Yamada et al.(2007)の fanning-linear モデルを採用した。計算対象は 20~0 Ma および 0~400°C の範囲における熱履歴とした。現在(0 Ma)の温度は、地表温度に相当するとみなし、 $15 \pm 15^\circ\text{C}$ に設定した。計算開始時の温度-時間範囲は、後述のジルコン U-Pb 年代およびジルコン FT 年代の測定結果を基に、20~10 Ma で 350~400°C とやや広めの制約を設けた。ジルコン FT 長のデータは、c 軸からの角度 60° 以上のものだけを用いた。アパタイト FT 長のデータは、Ketcham et al.(2007b)のモデルを用いて c 軸方向への投影を行った。カイネティックパラメーターには Cl 濃度(wt%)を採用したが、これはゼロトラックの粒子では D_{par} が測定できないこと、Cl 濃度が低いアパタイト(特に約 0.1 wt% 以下の場合)では D_{par} はアニーリング特性を適切に反映しない可能性があること(Green et al., 2005)を考慮したためである。各試料の計算は、適合度が高い(goodness of fit が >0.5)温度-時間パスが 100 本得られるまで継続した(Table A1)。

なお、楠八重型の 2 試料(SBGr-S1 と SB101)については、再加熱の有無の検討のため、制約条件を追加したパターンの計算も行った(Fig. 5a2, c2)。すなわち、いったん 13~10 Ma にアパタイト FT 法の PAZ 以下まで冷却した後、

11~9 Ma にアパタイト FT 法の PAZ 以上まで再加熱されるような制約を設けた。これらの制約条件は, SBGr-S1 の熱履歴解析結果から推定される桶八重型の一般的な熱史 (Fig. 5a1) と, SB101 のアパタイト FT 年代から推定される再加熱の時期と温度から決定した。

謝 辞

本報告は経済産業省資源エネルギー庁委託事業「平成 30-31 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (地質環境長期安定性評価技術高度化開発)」の成果の一部である。本稿は, 査読者の長谷部徳子教授 (金沢大) と大橋聖和博士 (山口大), 担当編集委員の大坪 誠博士 (産総研) のコメントにより大幅に改善された。FT 長測定用のアパタイトマウントの ^{252}Cf 照射処理にあたっては, メルボルン大学の Barry Kohn 教授にお世話になった。野外調査や試料採取にあたっては, 原子力機構の石丸恒存氏, 丹羽正和氏, 小松哲也氏, 清水麻由子氏にご助力を頂いた。大型薄片は同機構東濃地科学センターの吉川清盛氏, 有賀千恵氏に作成していただいた。

文 献

- Albert, P. G., Smith, V. C., Suzuki, T., McLean, D., Tomlinson, E. L., Miyabuchi, Y., Nakagawa, T., 2019, Quaternary widespread Japanese tephrstratigraphic markers and correlations to the Lake Suigetsu sedimentary archive (SG06 core). *Quat. Geochronol.*, **52**, 103–131.
- Carlson, W. D., Donelick, R. A. and Ketcham, R. A., 1999, Variability of apatite fission-track annealing kinetics: I. Experimental results. *Am. Mineral.*, **84**, 1213–1223.
- Cherniak, D. J. and Watson, E. B., 2000, Pb diffusion in zircon. *Chem. Geol.*, **172**, 5–24.
- 第四紀火山カタログ委員会, 1999, 日本の第四紀火山カタログ. 日本火山学会. [Committee for Catalog of Quaternary Volcanoes in Japan, 1999, *Catalog of Quaternary Volcanoes in Japan*. Volcanol. Soc. Japan.]
- Danhara, T. and Iwano, H., 2009, Determination of zeta values for fission-track age calibration using thermal neutron irradiation at the JRR-3 reactor of JAEA, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **115**, 141–145.
- Danhara, T. and Iwano, H., 2013, A review of the present state of the absolute calibration for zircon fission track geochronometry using the external detector method. *Isl. Arc*, **22**, 264–279.
- Donelick, R. A. and Miller, D. S., 1991, Enhanced TINT fission track densities in low spontaneous track density apatites using ^{252}Cf -derived fission fragment tracks: A model and experimental observations. *Nucl. Tracks*, **18**, 301–307.
- Donelick, R. A., O'Sullivan, P. B. and Ketcham, R. A., 2005, Apatite fission-track analysis. *Rev. Mineral. Geochem.*, **58**, 49–94.
- Galbraith, R. F., 1981, On statistical models for fission track counts. *Math. Geol.*, **13**, 471–478.
- Gleadow, A. J. W., Duddy, I. R., Green, P. F. and Lovering, J. F., 1986, Confined fission track lengths in apatite: A diagnostic tool for thermal history analysis. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **94**, 405–415.
- Green, P. F., Duddy, I. R. and Hegarty, K. A., 2005, Comment on “Compositional and structural control of fission track annealing in apatite” by J. Barbarand, A. Carter, I. Wood and A. J. Hurford, *Chemical Geology*, 198 (2003) 107–137. *Chem. Geol.*, **214**, 351–358.
- Harrison, T. M. and Clarke, G. K. C., 1979, A model of the thermal effects of igneous intrusion and uplift as applied to Quottoo pluton, British Columbia. *Can. J. Earth Sci.*, **16**, 411–420.
- Hasebe, N., Carter, A., Hurford, A. J. and Arai, S., 2009, The effect of chemical etching on LA-ICP-MS analysis in determining uranium concentration for fission-track chronometry. *Geol. Soc. London Spec. Publ.*, **324**, 37–46.
- Hasebe, N., Tagami, T. and Nishimura, S., 1994, Towards zircon fission-track thermochronology: Reference framework for confined track length measurements. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sec.)*, **112**, 169–178.
- Hasebe, N., Tamura, A. and Arai, S., 2013, Zeta equivalent fission-track dating using LA-ICP-MS and examples with simultaneous U–Pb dating. *Isl. Arc*, **22**, 280–291.
- 橋本 勇, 1962, 九州南部における時代未詳層群の総括. 九大教養地学研報, **9**, 13–69. [Hashimoto, I., 1962, The sedimentary complex of uncertain ages in south Kyushu. *Rep. Earth Sci. Dep. Gen. Educ. Kyushu Univ.*, **9**, 13–69.]
- Hattori, K., Sakata, S., Tanaka, M., Orihashi, Y. and Hirata, T., 2017, U–Pb age determination for zircons using laser ablation-ICP-mass spectrometry equipped with six multiple-ion counting detectors. *J. Anal. At. Spectrom.*, **32**, 88–95.
- Hurford, A. J. and Watkins, R. T., 1987, Fission-track age of the tuffs of the Buluk Member, Bakate Formation, northern Kenya: A suitable fission-track age standard. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sec.)*, **66**, 209–216.
- Iwano, H., Danhara, T., Danhara, Y., Hirabayashi, S., Nakajima, T., Sakai, H. and Hirata, T., 2020, Zircon fission-track and U–Pb double dating using femtosecond laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry: a technical note. *Isl. Arc*, **29**, e12348, doi: 10.1111/iar.12348.
- Iwano, H., Danhara, T. and Hirata, T., 2018, Standardless fission-track ages of the IUGS age standards. *Chem. Geol.*, **488**, 87–104.
- Iwano, H., Danhara, T., Yuguchi, T., Hirata, T. and Ogasawara, M., 2019, Duluth Complex apatites: Age reference material for LA-ICP-MS-based fission-track dating. *Terra Nova*, **31**, 247–256.
- 岩野英樹・折橋裕二・檀原 徹・平田岳士・小笠原正継, 2012, 同一ジルコン結晶を用いたフィッション・トラックと U–Pb ダブル年代測定法の評価: 島根県川本花崗閃緑岩中の均質ジルコンを用いて. 地質雑, **118**, 365–375. [Iwano, H., Orihashi, Y., Danhara, T., Hirata, T. and Ogasawara, M., 2012, Evaluation of fission-track and U–Pb double dating method for identical zircon grains: Using homogeneous zircon grains in Kawamoto Granodiorite in Shimane prefecture, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **118**, 365–375.]
- Iwano, H., Orihashi, Y., Hirata, T., Ogasawara, M., Danhara, T., Horie, K., Yamamoto, K., 2013a, An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as a secondary U–Pb dating standard. *Isl. Arc*, **22**, 382–394.
- Iwano, H., Orihashi, Y., Ogasawara, M. and Hirata, T., 2013b, Preface: Zircon multichronology: Fission-track, U–Pb, and combined fission-track–U–Pb studies. *Isl. Arc*, **22**, 261–263.
- Jackson, S. E., Pearson, N. J., Griffin, W. L. and Belousova, E. A., 2004, The application of laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry to in situ U–Pb zircon geochronology. *Chem. Geol.*, **211**, 47–69.
- 加々美寛雄, 2005, 本州弧に分布する白亜紀~古第三紀花崗岩の活動と起源物質. 地質雑, **111**, 441–457. [Kagami, H., 2005, Formative periods and source materials of Cretaceous–Paleogene granitoids from Honshu Arc. *J. Geol. Soc. Japan*, **111**, 441–457.]
- 鹿児島大学理学部, 1997, 1997 年 3 月 26 日と 5 月 13 日に鹿児島県北西部で発生した地震. 地震予知連絡会会報, **58**, 630–637. [Faculty of Science, Kagoshima University, 1997, The earthquakes with M6.3 (March 26, 1997) and with M6.2

- (May 13, 1997) occurred in Northwestern Kagoshima Prefecture. *Rep. Coord. Committee Earthquake Prediction Japan*, **58**, 630–637.]
- Kato, A., Ohnaka, M. and Mochizuki, H., 2003, Constitutive properties for the shear failure of intact granite in seismogenic environments. *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, **108**, 2060, doi: 10.1029/2001JB000791.
- 河野義礼・植田良夫, 1966, 本邦産火成岩の K-Ar dating (V): 西南日本の花崗岩類. 岩石鉱物鉱床学会誌, **56**, 191–211. [Kawano, Y. and Ueda, Y., 1966, K-Ar dating on the igneous rocks in Japan (V): Granitic rocks in southwestern Japan. *J. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **56**, 191–211.]
- Ketcham, R. A., 2005, Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Rev. Mineral. Geochem.*, **58**, 275–314.
- Ketcham, R. A., Carter, A., Donelick, R. A., Barbarand, J. and Hurford, A. J., 2007a, Improved modeling of fission-track annealing in apatite. *Am. Mineral.*, **92**, 799–810.
- Ketcham, R. A., Carter, A., Donelick, R. A., Barbarand, J. and Hurford, A. J., 2007b, Improved measurement of fission-track annealing in apatite using c-axis projection. *Am. Mineral.*, **92**, 789–798.
- 久城育夫・荒牧重雄・青木謙一郎編, 1989, 日本の火成岩. 岩波書店, 206p. [Kushiro, I., Aramaki, S. and Aoki, K., eds., 1989, *Japanese Igneous Rock*. Iwanami Shoten Publ., 206p.]*
- 九州活構造研究会編, 1989, 九州の活構造. 東京大学出版会, 553p. [Research Group for Active Tectonics in Kyushu, ed., 1989, *Active Tectonics in Kyushu*. Univ. Tokyo Press, 553p.]
- Ludwig, K. R., 2012, *User's Manual for Isoplot/Ex Version 3.75: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley Geochronol. Center, Spec. Publ., **4**, Berkeley, 75p.
- Lukács, R., Harangi, S., Backmann, O., Guillong, M., Danišik, M., Buret, Y., Szepesi, J., 2015, Zircon geochronology and geochemistry to constrain the youngest eruption events and magma evolution of the Mid-Miocene ignimbrite flare-up in the Pannonian Basin, eastern central Europe. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **170**, 52, doi: 10.1007/s00410-015-1206-8.
- Mahony, S. H., Wallace, L. M., Miyoshi, M., Villamor, P., Sparks, R. S. J. and Hasenaka, T., 2011, Volcano-tectonic interactions during rapid plate-boundary evolution in the Kyushu region, SW Japan. *Bull. Geol. Soc. Am.*, **123**, 2201–2223.
- Makino, Y., Kuroki, Y. and Hirata, T., 2019, Determination of major to trace elements in metallic materials based on solid mixing calibration method using multiple spot-laser ablation-ICP-MS. *J. Anal. At. Spectrom.*, **34**, 1794–1799.
- Matsumoto, S., Nakao, S., Ohkura, T., Miyazaki, M., Shimizu, H., Abe, Y., Yamashita, Y., 2015, Spatial heterogeneities in tectonic stress in Kyushu, Japan and their relation to a major shear zone. *Earth Planets Space*, **67**, 172, doi: 10.1186/s40623-015-0342-8.
- 松崎達二・角田地文・石丸恒存・鎌田浩毅・檀原 徹・岩野英樹・吉岡 哲, 2004, 大規模火砕流による基盤岩への熱的影響の検討: フィッション・トラック法による熱履歴解析. 応用地質, **45**, 238–248. [Matsuzaki, T., Kakuta, C., Ishimaru, T., Kamata, H., Danhara, T., Iwano, H. and Yoshioka, T., 2004, Evaluation of thermal effects of large-scale pyroclastic flow deposits on basement rocks by fission-track method. *J. Japan Soc. Eng. Geol.*, **45**, 238–248.]
- Miller, J. A., Shibata, K. and Kawachi, Y., 1962, Potassium-argon ages of granitic rocks from the Outer Zone of Kyushu, Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **13**, 712–714.
- Miyachi, M., 1985, Fission track ages of some granitic rocks in the Outer Zone of Kyushu, Japan. *J. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*, **80**, 406–409.
- 宮地六美, 1995, 九州の新生代深成岩類・火山岩類・火砕岩類のフィッション・トラック年代の総括(1). 比較社会文化, **1**, 61–65. [Miyachi, M., 1995, Summary of the fission-track ages of the plutonic, volcanic and pyroclastic rocks in the Cenozoic Era of Kyushu, Japan(1). *Bull. Graduate Sch. Soc. Cult. Stud., Kyushu Univ.*, **1**, 61–65.]
- 向吉秀樹・林 広樹・内田嗣人・吉崎那都・武田哲也・後藤和彦……笠原敬司, 2018, 1997 年鹿児島県北西部地震と信域内の基盤から土壌までを切る断層の露頭. 地質雑, **124**, 361–366. [Mukoyoshi, H., Hayashi, H., Uchida, H., Yoshizaki, N., Takeuchi, T., Goto, K., Kasahara, K., 2018, Faults affecting the basement and surface soil in the aftershock area of the 1997 Northwestern Kagoshima Earthquake. *J. Geol. Soc. Japan*, **124**, 361–366.]
- 村田明広, 1999, 北薩屈曲と鹿児島県北西部地震(1997 年 3 月 26 日, 5 月 13 日). 構造地質, **43**, 93–97. [Murata, A., 1999, Hokusatsu Bend and Kagoshima-ken Hokuseibu Earthquakes of March 26 and May 13, 1997. *J. Tectonic Res. Group Japan*, **43**, 93–97.]
- 中田 高・今泉俊文編, 2002, 活断層詳細デジタルマップ. 東大出版会, 68p. [Nakata, T. and Imaizumi, T., eds., 2002, *Digital Active Fault Map of Japan*. Univ. Tokyo Press, 68p.]
- Nishimura, T. and Takada, Y., 2017, San-in shear zone in southwest Japan, revealed by GNSS observations. *Earth Planets Space*, **69**, 85, doi: 10.1186/s40623-017-0673-8.
- Nishimura, T., Yokota, Y., Tadokoro, K. and Ochi, T., 2018, Strain partitioning and interplate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data. *Geosphere*, **14**, 535–551.
- 大庭 昇, 1957, 鹿児島県北西部の紫尾花崗閃緑岩および捕獲岩類. 鹿児島大理科報告, **6**, 83–98. [Oba, N., 1957, Shibi granodiorite and xenoliths in the north-western part of Kagoshima Prefecture. *Sci. Rep. Kagoshima Univ.*, **6**, 83–98.]
- Obayashi, H., Tanaka, H., Hattori, K., Sakata, S. and Hirata, T., 2017, In situ $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ isotope ratio measurements using two Daly detectors equipped on an ICP-mass spectrometer. *J. Anal. At. Spectrom.*, **32**, 686–691.
- Ohzono, M., Sagiya, T., Hirahara, K., Hashimoto, M., Takeuchi, A., Hoso, Y., Doke, R., 2011, Strain accumulation process around the Atotsugawa fault system in the Niigata-Kobe Tectonic Zone, central Japan. *Geophys. J. Int.*, **187**, 977–990.
- Passchier, C. W. and Trouw, R. A. J., 2005, *Microtectonics*, 2nd Ed. Springer-Verlag, Berlin, 366p.
- Sakata, S., Hirakawa, S., Iwano, H., Danhara, T., Guillong, M. and Hirata, T., 2017, A new approach for constraining the magnitude of initial disequilibrium in Quaternary zircons by coupled uranium and thorium decay series dating. *Quat. Geochronol.*, **38**, 1–12.
- Shibata, K. and Nozawa, T., 1967, K-Ar ages of granitic rocks from the Outer Zone of Southwest Japan. *Geochem. J.*, **1**, 131–137.
- Shimizu, M., Shibata, K., Suzuki, K., Sueoka, S. and Niwa, M., 2017, CHIME monazite dating: Pb analysis on an RR=100 mm spectrometer and correction of interferences between Th, U, and Pb with natural monazite. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, **112**, 88–96.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, D. J., Crowley, J. L., Gerdes, A., Hancher, J. M., Whitehouse, M. J., 2008, Plešovice zircon: A new natural reference material for U-Pb and Hf isotope microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**, 1–35.
- Sueoka, S., Shimada, K., Ishimaru, T., Niwa, M., Yasue, K., Umeda, K., Iwano, H., 2017, Fission track dating of faulting events accommodating plastic deformation of biotites. *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, **122**, 1848–1859.
- Takayama, H. and Yoshida, A., 2007, Crustal deformation in Kyushu derived from GEONET data. *J. Geophys. Res. B: Solid Earth*, **112**, B06413, doi: 10.1029/2006JB004690.
- Tamura, T., Oohashi, K., Otsubo, M., Miyakawa, A. and Niwa, M., 2020, Contribution to crustal strain accumulation of mi-

- nor faults: a case study across the Niigata–Kobe Tectonic Zone, Japan. *Earth Planets Space*, **72**, 7, doi: 10.1186/s40623-020-1132-5.
- 脇田浩二・井川敏恵・宝田晋治, 2009, 20 万分の 1 日本シームレス地質図 DVD 版. 数値地質図, G-16, 産総研地調総合センター. [Wakita, K., Igawa, T. and Takarada, S., 2009, *Seamless Geological Map of Japan, 1: 200,000, DVD Edition*. Digital Geoscience Map, G-16, Geol. Surv. Japan, AIST.]
- Wallace, L. M., Ellis, S., Miyao, K., Miura, S., Beavan, J. and Goto, J., 2009, Enigmatic, highly active left-lateral shear zone in southwest Japan explained by aseismic ridge collision. *Geology*, **37**, 143–146.
- Watanabe, T. and Asamori, K., 2019, Dense GNSS observation at an active shear zone in southern Kyushu, southwest Japan. *Am. Geophys. Union Fall Meet.*, T13H-0324.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F., 1991, Free software helps map and display data. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, **72**, 441, doi: 10.1029/90EO00319.
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., Griffin, W. L., Meier, M., Oberli, F., ... Spiegel, W., 1995, Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses. *Geostand. NewsL.*, **19**, 1–24.
- Yamada, R., Murakami, M. and Tagami, T., 2007, Statistical modelling of annealing kinetics of fission tracks in zircon; Reassessment of laboratory experiments. *Chem. Geol.*, **236**, 75–91.
- Yamada, R., Tagami, T. and Nishimura, S., 1995, Confined fission-track length measurement of zircon: Assessment of factors affecting the paleotemperature estimate. *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sec.)*, **119**, 293–306.
- 山本温彦・大庭 昇・富田克利, 1988, 鹿児島県紫尾山花崗閃緑岩体の岩相変化. 鹿児島大学理学部紀要(地学・生物学), **21**, 35–49. [Yamamoto, M., Oba, N. and Tomita, K., 1988, Compositional variation of the Shibi-san granodiorite body, Kagoshima Prefecture, Japan. *Rep. Fac. Sci., Kagoshima Univ.*, **21**, 35–49.]
- 山本温彦・牛島 明, 1994, 鹿児島県北薩地域の花崗岩質岩脈類. 鹿児島大学理学部紀要(地学・生物学), **27**, 91–99. [Yamamoto, M. and Ushijima, A., 1994, Granitic dikes in the Hokusatu district, Kagoshima Prefecture. *Rep. Fac. Sci., Kagoshima Univ.*, **27**, 91–99.]
- [URL1] 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 1997 年 3 月 26 日の鹿児島県北西部の地震について(The Headquarters for Earthquake Research Promotion, Evaluation of Earthquake in the Northwestern Kagoshima Prefecture on March 26, 1997 (March 27, 1997))* , <https://www.jishin.go.jp/main/chousa/97mar4/index.htm>.
- [URL2] 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 出水断層帯の長期評価について(The Headquarters for Earthquake Research Promotion, Long-term Evaluation of Izumi Fault Zone)* , https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/96_izumi.pdf.
- [URL3] 気象庁, 地震月報(カタログ編) (Japan Meteorological Agency, Earthquake Catalogue)* , <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html>
- * English translation from the original written in Japanese.

以下の Appendix は、オープンファイルとして学会ホームページ上で公開しています。 <<http://www.geosociety.jp/publication/content0006.html>>

Fig. A1. (a) Scanned image of a large thin section of fragmented granodiorite (GD) and aplite layer featuring cataclasis. The sample was taken from point (B) in Fig. 2b. The thin section is normal to foliation, and parallel to an older lineation inclined to the east. Rectangles indicate locations of Fig. A1b–d. (b) Image in cross-polarized light showing the cross-cutting relationships among aplite (AP), vein calcite (Cal), and cataclasite matrix (Cat_m), indicating that the formation of the calcite vein preceded cataclasis. (c) Image in plane-polarized light showing plastic deformation of biotite (Bt) defining P and Y foliations, indicating a dextral sense of shear (black arrows). (d) Image in plane-polarized light showing plastic deformation of biotite (Bt) defining P foliation, indicating a sinistral sense of shear (white arrows).

Fig. A2. (a) Scanned image of a large thin section of a sample taken from point (B) in Fig. 2b. The thin section is normal to foliation, and parallel to a younger lineation inclined to the NNW. P–Y–R₁ fabric indicates a sinistral sense of shear (and normal faulting at the outcrop). Rectangles indicate locations of Fig. A2b and A2d. PSZ = Principal Slip Zone, and PSS = Prominent Slip Surface. (b) Biotite fish (white arrowhead) along the PSS shows a sinistral sense of shear (white arrows; related to normal faulting at the outcrop). (c) Enlarged image of part of Fig. A2b, with a line drawing depicting possible glide dislocation in the biotite fish. (d) Two biotite fish (two white arrowheads) along the P foliation in the PSZ showing sinistral sense of shear (white arrows; related to normal faulting at the outcrop). (e) Kink band developed in a larger biotite fish shown in (d) is evidence of dislocation gliding after the fish formed indicative that the deformation in the PSZ occurred under sufficient differential stress and lithostatic pressure, not near the ground surface.

Table A1. Summary of thermal inversion parameters for FT length data modeling. GOF = goodness of fit.

(著者プロフィール)

末岡 茂 日本原子力研究開発機構研究員. 05 年 京都大学理学部卒, 12 年 京都大学大学院理学研究科博士後期課程修了(理学博士), 12 年 日本原子力研究開発機構博士研究員, 14 年 日本原子力研究開発機構技術員, 18 年から現職. 研究内容: 熱年代学による地殻浅部のテクトニクスの解明, 特に島弧の山地形成史の解明. 本研究では, 地質調査・熱年代学的解釈・総括・原稿執筆を担当. E-mail : sueoka.shigeru@jaea.go.jp.

島田耕史 本研究では, 地質調査・構造地質学的解釈を担当.

照沢秀司 本研究では, 地質調査・構造地質学的解釈を担当.

岩野英樹 本研究では, 年代測定を担当.

檀原 徹 本研究では, 年代測定を担当.

小北康弘 本研究では, EPMA 分析を担当.

平田岳史 本研究では, LA-ICP-MS 分析を担当.

(要 旨)

末岡 茂・島田耕史・照沢秀司・岩野英樹・檀原 徹・小北康弘・平田岳史, 2021, フィッション・トラック熱年代解析および U-Pb 年代測定に基づいた南九州せん断帯に分布する破碎帯の活動時期. 地質雑, **127**, 25–39. (Sueoka, S., Shimada, K., Terusawa, S., Iwano, H., Danhara, T., Ogita, Y. and Hirata, T., 2021, Dating of a fault zone distributed in the South Kyushu shear zone based on fission-track thermochronology and U-Pb dating. *J. Geol. Soc. Japan*, **127**, 25–39.)

南九州せん断帯に分布する破碎帯の活動時期の制約のため, 紫尾山花崗閃緑岩体から再加熱を被っていない試料 2 点と破碎帯に切られたアプライト脈沿いの試料 1 点に, フィッション・トラック (FT) および U-Pb 解析を適用した. ジルコン U-Pb 年代は 14.0~13.5 Ma, ジルコン FT 年代は 14.7~13.7 Ma, アパタイト FT 年代は 12.6~10.0 Ma を示した. 本岩体は 14.0~13.5 Ma に浅所に貫入し, 60~130°C 以下まで急冷したと推定された. 平八重型と楠八重型の岩型で, 貫入時期と冷却史に違いは見られなかった. せん断センスの観察によれば, 破碎帯は約 200°C 以上でアプライト脈を複数回変位させている. 破碎帯の活動時期は, アプライト脈の貫入時期 (10.0 ± 0.8 Ma) 頃で, 岩体の貫入・初期冷却に伴う膨張・収縮による破碎ではなく, 岩体冷却後のテクトニックな作用に起因する可能性が高い.

科学論文では, 学説の検証可能性を保証することが重要です. そのため, 地質学雑誌掲載論文には, 重要な証拠となった試料がどこで得られたかを示しているものがあります. 言うまでもないことですが, 見学や採取を行う場合, 各自の責任において地権者や関係官庁への連絡と許可の取得の必要があることにご注意下さい. 詳しくは, 以下のサイトをご覧ください.

<http://www.geosociety.jp/publication/content0073.html>

一般社団法人日本地質学会