茨城県大子町に分布する中新世栃原流紋岩類の岩脈を用いた火山活動の年代とその応力場

Age and associated stress field of the Miocene Tochiwara Rhyolites using dikes in the Daigo Town, Northeast Japan

Abstract

細井 淳* 羽地俊樹* 岩野英樹**
檀原 徹** 平田岳史***

Jun Hosoi*, Toshiki Haji*,
Hideki Iwano**, Tohru Danhara** and
Takafumi Hirata***

2020年7月3日受付.

2020年9月8日受理.

* 産業技術総合研究所地質調査総合センター
Geological Survey of Japan, AIST, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan

** 株式会社京都フィッション・トラック
Kyoto Fission-Track Co., Ltd., 44-4 Minami-tajiricho, Omiya, Kita, Kyoto 603-8832, Japan

*** 東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設
Geochemical Research Center, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Corresponding author: J. Hosoi,
j.hosoi@aist.go.jp

The Neogene paleostress field around the Tanakura Fault Zone was investigated by fault analysis, such as mesoscale fault analysis and fault shear sense analysis. Since it is usually unknown when each fault was formed, these analyses are difficult to determine the age of paleostress field of the results. In this study, we studied rhyolite dikes of the Neogene Tochiwara Rhyolites to obtain data of paleostress and its age. Age of Tochiwara Rhyolites magmatism was constrained by zircon U–Pb dating, and paleostress field was revealed by analysis of dikes. The paleostress field revealed by analysis of the rhyolite dikes suggests a normal-faulting stress regime with a WNW–ESE-trending σ_3 -axis, while zircon U–Pb dating of a rhyolite dike yielded a Miocene age of 17.2 ± 0.2 Ma (2σ). The results show that the Tochiwara Rhyolites were erupted under WNW–ESE extension when the Tanakura Basin began to form at ca. 17 Ma. These data provide clues to the development of the Tanakura Basin and the Neogene kinematic history of the Tanakura Fault Zone.

Keywords: Opening of the Sea of Japan, stress regime, Neogene, zircon, U–Pb dating, paleostress analysis, dike, Tanakura Fault, Tanakura Basin, Ibaraki

1. はじめに

茨城県北部、棚倉断層帯(本論では、棚倉西縁断層、棚倉東縁断層およびその間の断層と破碎帯を含めた総称として棚倉断層帯を用いる)の西側には中新世の堆積盆(以下、棚倉堆積盆)が発達する(Fig. 1)。棚倉堆積盆は日本海拡大のテクトニクスに関連して急速に発達した堆積盆で、棚倉断層帯の活動によって、17–15 Maの間に急速な沈降と海進、隆起が生じたと考えられている(天野ほか, 2011; Hosoi et al., 2020)。棚倉断層帯を日本海拡大時の巨大トランスフォーム断層の一つとみなす研究もあり(柳井ほか, 2010)、当時の古応力場と棚倉断層帯の活動は、日本海拡大のテクトニクスを考える上で重要な情報をもたらす。しかし中新世の棚倉断層帯の活動や当時の応力場については、以下のように様々な議論があり、未解決である。

大槻(1975)や佐藤ほか(1982)、越谷(1986)は小断層解析等から σ_{Hmax} 軸が NE–SW 方向の応力場により、棚倉断層帯は右横ずれセンスの活動をしたと考えた。一方、桑原(1981)は棚倉断層帯周辺に発達する地質図規模の断層の運

動センスを調べ、リーデルシアの配列と比較し、左横ずれ運動と結論づけた。淡路ほか(2006)は棚倉破碎帯内の断層の分布様式と断層ガウジの微細組織、断層の姿勢と剪断センスを用いた解析を行った。その結果、応力 S1 (σ_1 = WNW–ESE 水平方向, σ_3 = NNE–SSW 水平方向)から応力 S3, 4 (σ_1 = NNE–SSW 水平方向, σ_3 = WNW–ESE 水平方向)に変換し、棚倉破碎帯は左横ずれ運動後に右横ずれ運動を経験したと考えた。断層を用いた応力解析は、断層の活動時期を決めることが難しいため、棚倉断層周辺で実施されたこれらの研究は、得られた運動方向や古応力がいつの時代のものか特定するのは難しかった。その一方、岩脈を用いた応力解析は、岩脈の年代を明らかにすることで、古応力の時代を特定することが可能である。ジルコン U–Pb 年代測定を行うことで、高精度な年代を求めることが可能であり、岩脈解析とジルコン年代測定を組み合わせた古応力の検討は、複雑な運動史や応力史が想定される棚倉地域のテクトニクスに有用な情報を提示すると考えられる。しかし、そのような研究が本地域において行われた例はない。

棚倉堆積盆の西方、ジュラ紀付加体の中には中新世の栃

Fig. 1. (a) Index map of the study area. (b) Simplified geological map of the Tanakura Basin area (modified from Wakita et al., 2009) showing the distribution of the Tochiyama Rhyolites.

はら
原流紋岩類が分布する (Fig. 1). 田切・青井(2005)は栃原流紋岩類の産状や化学組成を示したほか、2 試料分の黒雲母 K-Ar 年代値を報告した。その両者の年代値は 15.5 ± 0.4 Ma と 18.0 ± 0.5 Ma (誤差は 1σ : 田切ほか, 2008) である。同質火山岩同士であるにも関わらず、両者の年代値には数百万年の違いがある。

そこで本論では、ジルコン U-Pb 年代測定を用いて、栃原流紋岩類中の岩脈の年代を求めた。その上で、栃原流紋岩類の流紋岩岩脈群を用いて古応力解析を行い、流紋岩岩脈形成時の応力場について検討した。

2. 地質概説

栃原流紋岩類は主に流紋岩貫入岩と火山砕屑岩、礫岩から構成される。棚倉断層帯、棚倉堆積盆の西方に分布し、ジュラ紀付加体中に点在する。その中で、大沢川上流の栃原周辺には比較的規模が大きい流紋岩類が、円形に分布する (Fig. 2)。そこでは、栃原流紋岩類とジュラ紀付加体は断層で接するか、高角度のアバット不整合の関係である。流紋岩貫入岩は切り草^{きりくさ}周辺に地表露出幅で数百 m のネック又はストックとして分布するほか、火山砕屑岩や礫岩中に幅数 m の流紋岩岩脈が認められる。流紋岩岩脈は栃原流紋岩類の分布範囲内に点在するが、ジュラ紀付加体との境界付近に認められるものが多い (Fig. 2)。火山砕屑岩は流紋岩貫入岩と同質の

流紋岩礫を主体としたものと、付加体の砂岩や泥岩の礫を主体としたものがある。流紋岩礫を含むものは、本論では火山砕屑岩とした。礫岩は付加体の砂岩や泥岩の礫から構成される角礫岩である。火山砕屑岩および礫岩は主に塊状で淘汰はあまり良くない。一部で不明瞭な成層構造が認められる。

栃原流紋岩類は流紋岩貫入岩と火山砕屑岩中の流紋岩礫のいずれも同質で、記載岩石学的に違いはない。斑晶は乏しく、かつ斑晶は細粒で、その最大長径は主に 1 mm 未満である。斑晶鉱物は斜長石、黒雲母、石英、不透明鉱物から構成され、その量比は多少変化する。石基はガラス質～隠微晶質で、微細な斜長石、シリカ鉱物、ガラス、変質鉱物、不透明鉱物などからなる。流理構造の発達が顕著なものが多い。長径 0.1~0.5 mm 程度のスフェルライトが認められることがある。比較的斑晶が粗粒のものと細粒なもの、それぞれの代表的な流紋岩岩脈の鏡下の写真を Fig. 3 に示す。

3. 手法と結果

1. 年代測定

流紋岩岩脈から試料 (試料名: 190726-2) を採取し、ジルコン U-Pb 年代測定を行った。測定試料は調査地内で比較的斑晶が大きい流紋岩岩脈から採取した。試料採取位置は Fig. 2 に示す。抽出したジルコン結晶はランダムに選んだ約 100 粒を外表面が露出するように PFA (フッ素樹脂) シー

Fig. 2. Route map of the study area showing the distribution of the Tochiara Rhyolites and rhyolite intrusive rocks, and sampling locality 190726-2. The 1:25,000-scale topographic base map is from the Geospatial Information Authority of Japan.

Fig. 3. Microphotographs of rhyolite intrusive rocks of the Tochiara Rhyolites, under cross-polarized light. (a) Rhyolite containing relatively large phenocrysts. This sample was used for U-Pb dating. (b) Rhyolite containing relatively small phenocrysts. Pl: plagioclase, Qtz: quartz, Bt: biotite, Zrn: Zircon.

トに埋め込み、ダイヤモンドペーストで研磨した。

LA-ICP-MS(レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析)法により、U-Pb年代測定を行った。測定手法はIwano et al. (2020)に従った。分析装置は四重極型ICP-MS(Thermo Fisher Scientific, iCAP-TQ)と、レーザーサンプリング装置としてフェムト秒レーザー(Light Conver-

sion, CARBIDE)を組み合わせた。測定装置の詳細および使用分析装置とその条件をTable 1に示す。今回用いたフェムト秒レーザーは約10 μmの円形で固定してある。本測定では広い面積での平均的なウラン濃度を求めるために、約30 μm×30 μmの範囲でガルバノ光学系による多数点同時分析(Yokoyama et al., 2011)を行った。分析では、²⁹Si,

Table 1. Instruments and operational conditions for the LA-ICP-MS analyses.

Laser ablation system		ICP-MS	
Model	CARBIDE (Light Conversion)	Model	Thermo Fisher Scientific iCAP-TQ
Laser type	Femtosecond laser	ICP-MS type	Quadrupole
Pulse duration	290 fs	Scanning mode	Kinetic Energy Discrimination (KED) mode (He gas was used, 4 mL min ⁻¹)
Wave length	257 nm	Forward power	1550 W
Energy density	3.7 J/cm ²	Make-up gas (Ar)	1.0 L min ⁻¹
Laser power	50%	ThO ⁺ /Th (oxide ratio)	< 1%
Spot size	10 μm	Data acquisition protocol	Time-resolved analysis
Repetition rate	100 Hz	Data acquisition	25 s (15 s gas blank, 10 s ablation)
Duration of laser ablation	10 s	Monitor isotopes	²⁹ Si, ²⁰² Hg, ²⁰⁴ Pb, ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb, ²⁰⁸ Pb, ²³² Th, ²³⁸ U
Sampling mode	Multiple-spot per grain with Galvanometric optics	Dwell time	0.2 s for ²⁰⁶ Pb and ²⁰⁷ Pb, 0.1 s for others
Sampling area	30 × 30 μm ²	Primary standard	Nancy 91500 ^{*1} (U-Pb)
Carrier gas (He)	0.60 L min ⁻¹	Secondary standard	OD-3 ^{*2,3,4} , Plešovice ^{*5}

*1, Wiedenbeck et al. (1995); *2, Iwano et al. (2012); *3 Iwano et al. (2013); *4, Lukács et al. (2015); *5, Sláma et al. (2008)

Fig. 4. (a) Cathodoluminescence images of the youngest and oldest zircons from the Tochiara Rhyolites. (b) Zircon ^{238}U - ^{206}Pb age histogram and probability density curve. (c) Concordia diagram showing individual zircon U-Pb data. The dotted ellipse indicates discordant zircon data. MSWD: mean square weighted deviation.

^{202}Hg , ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U をモニターし, ^{238}U - ^{206}Pb 年代および ^{235}U - ^{207}Pb 年代を求めた. U-Pb年代測定のための補正には1次スタンダードとしてNancy 91500ジルコン(1065.4 ± 0.6 Ma: Wiedenbeck et al., 1995)を用い, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0.17917$ の値を用いた. さらに, 年代測定結果の正確性を評価するために, 2次スタンダードとしてOD-3ジルコン(33.0 ± 0.1 Ma: 岩野ほか, 2012; Iwano et al., 2013)とPlešoviceジルコン

(337.13 ± 0.37 Ma: Sláma et al., 2008)も分析した. 年代誤差には試料の分析前後に測定した91500ジルコンの $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ および $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比の繰り返し再現性(%2SD)を外部誤差として伝播させた. 各同位体信号に由来する計数統計誤差も年代誤差に伝播させた.

ジルコン粒子のカソードルミネッセンス像は, LA-ICP-MS分析後, 産業技術総合研究所所有のカソードルミネッセンス装置(Gatan, Mini CL)を搭載した走査型電子顕微鏡

Table 2. Zircon U–Pb isotopic data for zircon crystals from sample 190726-2.

grain No.	Th U	Isotopic ratios						U-Pb age (Ma)				Remarks
		²⁰⁷ Pb	Error 2σ	²⁰⁶ Pb	Error 2σ	²⁰⁷ Pb	Error 2σ	²⁰⁶ Pb	Error 2σ	²⁰⁷ Pb	Error 2σ	
		²³⁸ U		²³⁸ U		²³⁵ U		²³⁸ U		²³⁵ U		
no. 1	0.29	0.0461 ± 0.0165	0.0026 ± 0.0002	0.0168 ± 0.0058	16.98 ± 1.23	16.90 ± 5.91						
no. 2	0.26	0.0433 ± 0.0192	0.0026 ± 0.0002	0.0155 ± 0.0067	16.76 ± 1.49	15.67 ± 6.80						
no. 3	0.31	0.0373 ± 0.0138	0.0026 ± 0.0002	0.0136 ± 0.0049	17.01 ± 1.17	13.72 ± 4.97						
no. 4	0.28	0.0427 ± 0.0157	0.0026 ± 0.0002	0.0151 ± 0.0054	16.54 ± 1.19	15.23 ± 5.47						
no. 5	0.23	0.0489 ± 0.0242	0.0025 ± 0.0003	0.0168 ± 0.0081	16.01 ± 1.68	16.90 ± 8.18						
no. 6	0.35	0.0439 ± 0.0158	0.0027 ± 0.0002	0.0165 ± 0.0058	17.51 ± 1.25	16.57 ± 5.85						
no. 7	0.27	0.0605 ± 0.0216	0.0026 ± 0.0002	0.0221 ± 0.0076	17.02 ± 1.37	22.17 ± 7.69						
no. 8	0.28	0.0401 ± 0.0157	0.0026 ± 0.0002	0.0143 ± 0.0055	16.62 ± 1.25	14.41 ± 5.52						
no. 9	0.44	0.0423 ± 0.0155	0.0027 ± 0.0002	0.0160 ± 0.0057	17.68 ± 1.27	16.14 ± 5.78						
no. 10	0.33	0.0427 ± 0.0193	0.0027 ± 0.0002	0.0162 ± 0.0071	17.69 ± 1.59	16.30 ± 7.23						
no. 11	0.29	0.0560 ± 0.0204	0.0027 ± 0.0002	0.0210 ± 0.0074	17.52 ± 1.40	21.13 ± 7.51						
no. 12	0.24	0.0717 ± 0.0330	0.0025 ± 0.0003	0.0252 ± 0.0112	16.38 ± 1.89	25.24 ± 11.32						
no. 13	0.26	0.0783 ± 0.0290	0.0025 ± 0.0002	0.0275 ± 0.0098	16.40 ± 1.54	27.57 ± 9.90						
no. 14	0.36	0.0487 ± 0.0177	0.0025 ± 0.0002	0.0170 ± 0.0060	16.28 ± 1.23	17.11 ± 6.07						
no. 15	0.22	0.0547 ± 0.0310	0.0027 ± 0.0003	0.0202 ± 0.0112	17.23 ± 2.20	20.31 ± 11.27						
no. 16	0.31	0.0435 ± 0.0190	0.0025 ± 0.0002	0.0153 ± 0.0065	16.40 ± 1.44	15.42 ± 6.60						
no. 17	0.32	0.0532 ± 0.0180	0.0028 ± 0.0002	0.0205 ± 0.0067	17.94 ± 1.29	20.57 ± 6.78						
no. 18	0.33	0.0527 ± 0.0198	0.0028 ± 0.0002	0.0205 ± 0.0075	18.18 ± 1.47	20.64 ± 7.57						
no. 19	0.23	0.0546 ± 0.0246	0.0028 ± 0.0003	0.0214 ± 0.0094	18.31 ± 1.94	21.53 ± 9.54						
no. 20	0.27	0.0510 ± 0.0209	0.0026 ± 0.0002	0.0181 ± 0.0073	16.60 ± 1.55	18.23 ± 7.34						
no. 21	0.25	0.0438 ± 0.0162	0.0028 ± 0.0002	0.0172 ± 0.0063	18.31 ± 1.46	17.29 ± 6.33						
no. 22	0.28	0.0279 ± 0.0129	0.0028 ± 0.0002	0.0108 ± 0.0049	18.01 ± 1.44	10.87 ± 4.97					discordant	
no. 23	0.27	0.0432 ± 0.0189	0.0027 ± 0.0003	0.0162 ± 0.0070	17.54 ± 1.62	16.36 ± 7.05						
no. 24	0.27	0.0436 ± 0.0215	0.0025 ± 0.0003	0.0153 ± 0.0074	16.38 ± 1.71	15.43 ± 7.49						
no. 25	0.28	0.0632 ± 0.0228	0.0027 ± 0.0002	0.0236 ± 0.0083	17.45 ± 1.59	23.71 ± 8.41						
no. 26	0.42	0.0522 ± 0.0151	0.0027 ± 0.0002	0.0195 ± 0.0055	17.40 ± 1.18	19.57 ± 5.58						
no. 27	0.34	0.0411 ± 0.0133	0.0028 ± 0.0002	0.0156 ± 0.0050	17.74 ± 1.21	15.76 ± 5.05						
no. 28	0.29	0.0328 ± 0.0128	0.0027 ± 0.0002	0.0123 ± 0.0047	17.45 ± 1.28	12.37 ± 4.76						
no. 29	0.30	0.0463 ± 0.0166	0.0029 ± 0.0002	0.0185 ± 0.0065	18.65 ± 1.47	18.62 ± 6.59						
no. 30	0.33	0.0389 ± 0.0121	0.0028 ± 0.0002	0.0150 ± 0.0046	18.01 ± 1.16	15.12 ± 4.66						
no. 31	0.28	0.0545 ± 0.0192	0.0028 ± 0.0002	0.0208 ± 0.0071	17.78 ± 1.48	20.88 ± 7.22						
no. 32	0.28	0.0539 ± 0.0193	0.0026 ± 0.0002	0.0193 ± 0.0068	16.75 ± 1.42	19.45 ± 6.87						
no. 33	0.34	0.0419 ± 0.0163	0.0025 ± 0.0002	0.0145 ± 0.0055	16.10 ± 1.32	14.58 ± 5.60						
no. 34	0.32	0.0521 ± 0.0164	0.0027 ± 0.0002	0.0192 ± 0.0059	17.17 ± 1.26	19.26 ± 5.96						
no. 35	0.24	0.0620 ± 0.0303	0.0026 ± 0.0003	0.0226 ± 0.0107	16.98 ± 2.06	22.66 ± 10.84						
no. 36	0.33	0.0484 ± 0.0185	0.0026 ± 0.0002	0.0171 ± 0.0064	16.48 ± 1.41	17.19 ± 6.48						
no. 37	0.25	0.0475 ± 0.0236	0.0025 ± 0.0003	0.0166 ± 0.0081	16.35 ± 1.79	16.74 ± 8.20						
no. 38	0.27	0.0599 ± 0.0250	0.0027 ± 0.0003	0.0223 ± 0.0091	17.40 ± 1.79	22.43 ± 9.20						
no. 39	0.31	0.0439 ± 0.0139	0.0028 ± 0.0002	0.0168 ± 0.0052	17.86 ± 1.23	16.93 ± 5.29						
no. 40	0.28	0.0561 ± 0.0196	0.0025 ± 0.0002	0.0194 ± 0.0066	16.15 ± 1.35	19.52 ± 6.69						
no. 41	0.27	0.0414 ± 0.0175	0.0028 ± 0.0002	0.0158 ± 0.0066	17.78 ± 1.57	15.89 ± 6.65						
no. 42	0.30	0.0513 ± 0.0197	0.0026 ± 0.0002	0.0186 ± 0.0070	16.95 ± 1.50	18.73 ± 7.09						
		Weighted mean of the concordant zircon grain ages (n = 41)						17.2 ± 0.2	0.2	17.3 ± 1.0	1.0	
Standards												
PSV 4-1	0.09	0.0603 ± 0.0117	0.0519 ± 0.00191	0.4324 ± 0.0818	326.48 ± 12.29	364.91 ± 79.87						
PSV 4-2	0.09	0.0526 ± 0.0065	0.0521 ± 0.00172	0.3781 ± 0.0486	327.44 ± 11.08	325.66 ± 48.15						
OD3 4-1	1.25	0.0459 ± 0.0162	0.0051 ± 0.00036	0.0322 ± 0.0111	32.73 ± 2.34	32.20 ± 11.19						
OD3 4-2	1.27	0.0469 ± 0.0150	0.0053 ± 0.00037	0.0340 ± 0.0107	33.77 ± 2.41	33.92 ± 10.79						

(JEOL, JSM-6610LV)を用いて撮影した。

約 200 粒のジルコン結晶を測定試料約 200 g から得た。これらのジルコン結晶は長柱状の自形結晶が多く、その長径は 0.1 mm 程度である。また、ジルコン結晶は包有物が少なく、累帯構造はほとんど認められない (Fig. 4)。U–Pb 年代測定では、²³⁸U–²⁰⁶Pb 年代と ²³⁵U–²⁰⁷Pb 年代が 2σ 誤差内で一致するものをコンコードアントと解釈し、測定粒子 42 粒中、41 粒子がコンコードアントと解釈された (Table 2)。また、2 次スタンダードとして測定した OD-3 および

Plešovice ジルコンの年代結果は、誤差範囲で標準年代と一致することから、本測定の信頼性を保証する。コンコードアントと解釈された 41 粒子の ²³⁸U–²⁰⁶Pb 年代の加重平均値は、17.2 ± 0.2 Ma (誤差 2σ) である。41 粒子の年代分布は明瞭な単峰性を示す (Fig. 4)。また、それらの加重平均値の MSWD は 0.92 で 1 に近く、母集団の年代分布の再現性は高いと考えられる。したがって、これら全てを本質ジルコン結晶とみなし、コンコードアントと解釈された 41 粒子の ²³⁸U–²⁰⁶Pb 年代の加重平均値を、本試料の U–Pb 年代とす

る。

2. 岩脈を用いた応力解析

栃原流紋岩類周辺のジュラ紀付加体中には、栃原流紋岩類に関連した岩脈だけでなく、様々な時代の貫入岩が認められる (Takahashi et al., 2005; 小泉ほか, 2006)。そこで、解析対象を栃原流紋岩類と同時期の岩脈に限定するために、栃原流紋岩類の火山砕屑岩又は礫岩に貫入する流紋岩岩脈のみから方位データを採取した。本研究では、明瞭な貫入面が認められた岩脈に限定し、9枚の栃原流紋岩類の岩脈の貫入面の方位を露頭で測定した。岩脈解析法を得た方位データに適用して古応力を推定した。

栃原流紋岩類からは信頼できる地層の傾動データが得られなかった。しかし栃原流紋岩類が大幅に傾動しているとは考えにくい。なぜならば、周囲の新第三系は北～西方向に20–30°程度の傾斜で整っており (天野ほか, 2011)、かつジュラ紀付加体の地質構造は栃原流紋岩類の周辺部で乱れていない (Nakae, 2006)。つまり栃原流紋岩類は緩傾斜と考えられる。その一方、栃原流紋岩中の岩脈の貫入面は多くが60°以上の高角度傾斜であり、岩脈の貫入方向は周囲の岩体の構造に規制されていないと考えられる。9枚の岩脈のうち、7枚の岩脈の貫入面の極はWNW–ESE方向にまとまったが、残り2枚はそれと大きく斜交する方向だった。

岩脈解析には、ビンガム分布を用いた解析ソフトウェアである GArCmB (Yamaji, 2016) を用いた。この手法では、岩脈の姿勢の方位分布にビンガム分布を当てはめて古応力を推定する。当てはめたビンガム分布の3つの主軸が各々の応力の3つの応力主軸と読み替えられる (Yamaji et al., 2010)。また、ビンガム分布の集中度パラメータから応力の応力比も求まる。応力比 Φ とは、 $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ で表され、0 から 1 までの値を持つ (主応力は圧縮を正とし、 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ とする)。応力比は、中間主応力の大きさを相対的に表すパラメータで、 Φ が 1 であればその応力が軸性引張応力であることを、0 であれば軸性圧縮であることを意味する。なお、GArCmB は複数の応力を分離検出できる手法であるが、本研究で扱った方位データは9つと少数であり、2つ以上の応力を検出するために必要なデータ数に満たなかった。そのため、本研究ではすべての岩脈が同一の応力の下で貫入したものとして解析を行った。

栃原流紋岩類の岩脈方位データの解析の結果、応力比が中程度の WNW–ESE 引張の正断層型応力が検出された (Fig. 5)。3つの主応力軸はそれぞれ、 σ_1 軸が鉛直から西に約20°傾いた方向、 σ_2 軸がNNE方向に20°傾いた方向、 σ_3 軸がESE方向に約20°傾いた方向であった。また、応力比は0.40であった。主応力軸はやや傾いているが、 σ_1 軸が鉛直に近く、正断層型の応力であるといえる。

4. 議論

栃原流紋岩類の岩脈は 17.2 ± 0.2 Ma (誤差 2σ) のジルコン U–Pb 年代値を示した。これは、田切・青井 (2005) が栃原流紋岩類の岩脈から報告した 15.5 ± 0.4 Ma と 18.0 ± 0.5 Ma の黒雲母 K–Ar 年代値 (誤差 1σ) とやや異なるが、

Fig. 5. Paleo-stress analysis of the rhyolite dikes. The lower-hemisphere, equal-area projection shows poles to dikes and the three principal stress axes with 95% confidence intervals indicated.

古い方の年代値とは誤差 2σ の範囲で一致する。

栃原流紋岩類の岩脈の形成年代は、黒雲母 K–Ar 年代値よりジルコン U–Pb 年代値の方が適切と考えた。最も大きな理由は、黒雲母 K–Ar 年代がジルコン U–Pb 年代よりも変質の影響を受けやすいことである。実際に、栃原流紋岩類の流紋岩は同質にも関わらず2つの異なる黒雲母 K–Ar 年代値が得られていることを考慮すると、若返り等の影響を否定できない。その一方、ジルコン U–Pb 年代値は閉鎖温度が高く、マグマ中でのジルコン晶出年代を示すため、ジルコン U–Pb 年代値と栃原流紋岩類の噴出年代とのずれの大きさを見積もれるかが重要である。栃原流紋岩類は斑晶に乏しく、かつ斑晶は長径 1 mm 未満の微細なものが占めている。ジルコン結晶も長径 0.1 mm 程度で細粒である。このことから、マグマが長時間地殻内部で滞留していたとは考えにくい。そのためマグマ中でジルコン晶出後、地質学的な時間を空けずに栃原流紋岩類の流紋岩マグマは噴出した可能性が高い。したがって、栃原流紋岩類の岩脈の形成年代はジルコン U–Pb 年代に近似できると考えた。

栃原流紋岩類 (貫入岩を除く) は 1 km^2 程度の極めて狭い範囲に分布し (Figs. 1 and 2)、かつ時間間隙を示すような堆積物や地質構造が認められない。本研究で得た岩脈の年代値は栃原流紋岩類の火成活動の年代と考えられる。

栃原流紋岩類の岩脈を用いた応力解析では、WNW–ESE

方向に σ_3 軸を持つ正断層型応力が得られた。これは、 σ_{Hmax} 軸が NE-SW 方向の応力場を想定した大槻(1975)や佐藤ほか(1982)、越谷(1986)の結果と矛盾しない。但し、これらの研究では正確な年代まで求められていないため、比較には注意を要する。栃原流紋岩類の岩脈の年代は 17.2 ± 0.2 Ma(誤差 2σ)を示すため、本結果で得られた応力配置は 17 Ma 頃のものである。この 17 Ma 頃は、棚倉堆積盆の形成開始時期であり(Hosoi et al., 2020)、本成果は特に棚倉堆積盆形成初期のテクトニクスを論じる際の貴重な情報になる。

棚倉堆積盆の発達史は棚倉断層帯の横ずれセンスの活動と結びつけて検討されてきた(例えば、天野ほか, 2011; Hosoi et al., 2020)。Hosoi et al.(2020)は、隣接する茂木地域にて、中期中新世頃 NNE-SSW 引張→E-W 引張→NNE-SSW 圧縮と応力が変化したこと(星・大槻, 1996)から、棚倉断層帯は棚倉堆積盆の発達初期の 17 Ma 頃には左横ずれセンス、後期の 15 Ma 頃には右横ずれセンスの活動をしたと考察した。しかし、17 Ma 頃に棚倉断層帯周辺が本研究で得た応力状態であったのなら、棚倉断層帯は左横ずれではなく、右横ずれセンスの活動をしていたことになる。また、多くの先行研究は水平面内の最大圧縮主応力軸の方向や断層の配列から棚倉断層帯の横ずれ方向のセンスを議論していた。本研究では主応力軸 3 軸の配置を決定し、その結果は σ_1 軸が鉛直方向の正断層型応力であった。これは、中新世の棚倉断層帯の変位量が水平成分よりも鉛直成分のほうが大きかった可能性を示す。棚倉堆積盆のテクトニクスは検討の余地がある。本研究により栃原流紋岩類が分布する範囲での応力状態が明らかになった。ただしこれが堆積盆全体を代表する応力を示すか否かは、より広い範囲で古応力を調べる必要があるだろう。

本研究のように、年代の正確な古応力の情報を蓄積していくことは、棚倉堆積盆の発達史や棚倉断層帯の活動履歴の解明に貢献すると期待される。日本海拡大のテクトニクスを検討するためにも、今後、中新世の棚倉断層帯周辺における古応力史解明、断層運動解明の研究がさらに進展することが期待される。

5. まとめ

茨城県大子町に分布する中新世栃原流紋岩類の岩脈は、棚倉堆積盆の形成開始時期に相当する 17 Ma 頃、WNW-ESE 方向に σ_3 軸を持つ正断層型応力下で形成されたと推定される。この成果は、棚倉堆積盆の発達史や棚倉断層帯の活動履歴解明のための重要な情報になると期待される。

謝 辞

本論は査読者の高木秀雄教授(早稲田大学)と伊藤久敏博士(電力中央研究所)から頂いたコメントによって改善された。本研究を遂行するにあたって、産総研地質情報基盤センター地質試料調製グループの方々には、薄片を作成して頂いた。以上の方々に深く感謝申し上げる。本研究は産総研地質調査総合センターの陸域地質図プロジェクトによる 5 万分の 1

地質図幅「大子」の調査研究で得られた成果の一部である。

文 献

- 天野一男・松原典孝・及川敦美・滝本春南・細井 淳, 2011, 棚倉断層の新第三紀テクトニクスと火山活動・堆積作用。地質雑, **117**, S69-S87. [Amano, K., Matsubara, N., Oikawa, A., Takimoto, H. and Hosoi, J., 2011, Neogene volcanism and sedimentation related to the tectonics of the Tanakura Fault, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **117**, S69-S87.]
- 淡路動太・山本大介・高木秀雄, 2006, 棚倉破砕帯の脆性領域における運動履歴。地質雑, **112**, 222-240. [Awaji, D., Yamamoto, D. and Takagi, H., 2006, Kinematic history of the Tanakura Shear Zone at brittle regime. *J. Geol. Soc. Japan*, **112**, 222-240.]
- 星 博幸・大槻憲四郎, 1996, 小断層解析により復元した茂木地域の前・中期中新世応力場の変遷。地質雑, **102**, 700-714. [Hoshi, H. and Otsuki, K., 1996, Reconstruction of the Early to Middle Miocene stress fields in the Motegi area, Northeast Japan, using minor fault analyses. *J. Geol. Soc. Japan*, **102**, 700-714.]
- Hosoi, J., Danhara, T., Iwano, H., Matsubara, N., Amano, K. and Hirata, T., 2020, Development of the Tanakura strike-slip basin in Japan during the opening of the Sea of Japan: constraints from zircon U-Pb and fission-track ages. *J. Asian Earth Sci.*, **190**, 104157, doi: 10.1016/j.jseae.2019.104157.
- 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.
- 岩野英樹・折橋裕二・檀原 徹・平田岳史・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., 2013, An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as secondary U-Pb dating standard. *Isl. Arc*, **22**, 382-394.
- 小泉一人・中江 訓・石渡 明, 2006, 茨城県大子地域のドレライト・斑れい岩の化学分析値。地調研報, **57**, 191-195. [Koizumi, K., Nakae, S. and Ishiwatari, A., 2006, Chemical analysis of dolerites and a gabbro at the Daigo district in Ibaraki Prefecture, central Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **57**, 191-195.]
- 越谷 信, 1986, 棚倉破砕帯の変形と運動。地質雑, **92**, 15-29. [Koshiya, S., 1986, Tanakura Shear Zone: The deformation process of fault rocks and its kinematics. *J. Geol. Soc. Japan*, **92**, 15-29.]
- 桑原 徹, 1981, 中新世における棚倉破砕帯の左横ずれ断層運動。地質雑, **87**, 475-487. [Kuwahara, T., 1981, Miocene left-lateral fault movement of the Tanakura Sheared Zone, Northeast Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **87**, 475-487.]
- Lukács, R., Harangi, S., Bachmann, O., Guillion, 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.
- Nakae, S., 2006, Stratigraphy and structure of the Jurassic accretionary complex in the Daigo district, northern Ibaraki and eastern Tochigi Prefectures, central Japan. *Bull. Geol.*

- Surv. Japan*, **57**, 29–50.
- 大槻憲四郎, 1975, 棚倉破砕帯の地質構造. 東北大地質古生物研邦文報, **76**, 1–71. [Otsuki, K., 1975, Geology of the Tanakura Shear Zone and adjacent area. *Contrib. Inst. Geol. Paleontol. Tohoku Univ.*, **76**, 1–71.]
- 佐藤比呂志・大槻憲四郎・天野一男, 1982, 東北日本弧における新生代応力場変遷. 構造地質研究会誌, **27**, 55–79. [Sato, H., Otsuki, K. and Amano, K., 1982, Neogene tectonic stress field of Northeast Honshu Arc. *J. Tectonic Res. Group Japan*, **27**, 55–79.]
- Sláma, J., Košler, J., Condon, J. D., Crowley, J. L., Gerdes, A., Hanchar, J. M.,... Whitehouse, M. J., 2008, Plešovice zircon—A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**, 1–35.
- 田切美智雄・青井亜希子, 2005, 茨城県大子町栃原地域の第三系栃原流紋岩類の産状, 岩相と K–Ar 年代. 茨城県自然博物館研究報告, **8**, 1–11. [Tagiri, M. and Aoi, A., 2005, Occurrences, rock facies and K–Ar age data of Tertiary Tochibara Rhyolites in the Tochibara District, Daigo Town, Ibaraki Prefecture. *Bull. Ibaraki Nat. Mus.*, **8**, 1–11.]
- 田切美智雄・青井亜希子・笠井勝美・天野一男, 2008, 大子地域中新世火山岩類の化学組成と K–Ar 年代—大子地域と茂木地域に産する新第三紀火山岩類の組成・層序対比. 地質雑, **114**, 300–313. [Tagiri, M., Aoi, A., Kasai, K. and Amano, K., 2008, Stratigraphic comparisons of the chemical characteristics and K–Ar ages of Miocene volcanic rocks from the Daigo and the Motegi districts. *J. Geol. Soc. Japan*, **114**, 300–313.]
- Takahashi, Y., Kagashima, S. and Mikoshiba, M., 2005, Geochemistry of adakitic quartz diorite in the Yamizo Mountains, central Japan: Implications for Early Cretaceous adakitic magmatism in the inner zone of southwest Japan. *Isl. Arc*, **14**, 150–164.
- 脇田浩二・井川敏恵・宝田晋治(編), 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. 産業技術総合研究所地質調査総合センター. [Wakita, K., Igawa, T. and Takarada, S., eds., 2009, *Seamless Geological Map of Japan at a Scale of 200,000 DVD Edition, Digital Geoscience Map G-16*. Geol. Surv. Japan, AIST.]
- Wiedenbeck, M., Alle, 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. Geoanal. Res.*, **19**, 1–23.
- Yamaji, A., 2016, Genetic algorithm for fitting a mixed Bingham distribution to 3D orientations: a tool for the statistical and paleostress analyses of fracture orientations. *Isl. Arc*, **25**, 72–83.
- Yamaji, A., Sato, K., Tonai, S., 2010, Stochastic modeling for the stress inversion of vein orientations: Paleostress analysis of Pliocene epithermal veins in southwestern Kyushu, Japan. *J. Struct. Geol.*, **32**, 1137–1146.
- 柳井修一・青木一勝・赤堀良光, 2010, 日本海の拡大と構造線—MTL, TTL そしてフォッサマグナ—. 地学雑, **119**, 1079–1124. [Yanai, S., Aoki, K. and Akahori, Y., 2010, Opening of Japan Sea and major tectonic lines of Japan: MTL, TTL and Fossa Magna. *J. Geogr. (Chigaku Zasshi)*, **119**, 1079–1124.]
- Yokoyama, D. T., Suzuki, T., Kon, Y. and Hirata, T., 2011, Determination of rare earth element abundance and U–Pb ages of zircons using multisport laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Anal. Chem.*, **83**, 8892–8899.

(著者の担当と貢献)

細井 淳 研究デザイン, 地質調査, 原稿執筆, CL 像撮影, 総括を担当.

羽地俊樹 地質調査, 原稿執筆, 応力解析を担当.

岩野英樹 年代測定とそのデータの解釈を担当.

檀原 徹 年代測定とそのデータの解釈を担当.

平田岳史 年代測定の補助と分析機器の開発, 維持を担当.

(要 旨)

細井 淳・羽地俊樹・岩野英樹・檀原 徹・平田岳史, 2021, 茨城県大子町に分布する中新世栃原流紋岩類の岩脈を用いた火山活動の年代とその応力場. 地質雑, **127**, 395–402. (Hosoi, J., Haji, T., Iwano, H., Danhara, T. and Hirata, T., 2021, Age and associated stress field of the Miocene Tochiyara Rhyolites using dikes in the Daigo Town, Northeast Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **127**, 395–402.)

新第三紀の棚倉断層帯周辺の古応力は, 主に断層を用いて調べられてきた. しかし断層の解析には時代制約が困難という弱点がある. 本論では, 新第三系栃原流紋岩類を対象に, 流紋岩岩脈のジルコン U–Pb 年代測定から火成活動の時代を制約し, 岩脈群を用いて当時の古応力を求めた. その結果, U–Pb 年代測定では 17.2 ± 0.2 Ma の年代を, 応力解析では WNW–ESE 方向に σ_3 軸を持つ正断層型応力を得た. 棚倉堆積盆の形成開始時期の 17 Ma 頃, 栃原流紋岩類の火成活動は, WNW–ESE 引張場で生じたことが推定された. この成果は, 棚倉堆積盆の発達史や棚倉断層帯の運動履歴解明のための重要な情報になると期待される.

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が必要であることに注意下さい. 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