

フィッション・トラック ニュースレター

第38号 (2025年12月)

日本フィッション・トラック研究会

第49回フィッション・トラック研究会

(2024年12月21日 - 22日 京都大学大学院理学研究科1号館 大会議室)

研究ノート: 断層試料中の希ガス放出と年代若返り: VG5400のNGX化による測定 佐藤佳子・熊谷英憲 -----	1
講演要旨: 段階エッチングによるモナザイトのフィッション・トラック分析 - 南極を含む複数の未知試料への適用 浅井勇人・福田将真・田上高広 -----	9
講演要旨: (U-Th)/He 熱年代学を用いた中国山地の隆起・削剥史の推定 旭 祐輔・福田将真・末岡 茂・Barry Kohn・田上高広 -----	13
講演要旨: 地殻の高温領域と山地の隆起形態の関連性: 飯豊山地における事例 福田将真・末岡 茂・中嶋 徹・Barry Kohn・田上高広 -----	17
講演要旨: 立山火山噴出物のジルコンU-Pb, U-Th double dating 伊藤久敏・丹保俊哉・飯田 肇 -----	22
講演要旨: 1次元熱移流-拡散-生成方程式に基づく数値モデリングと熱年代学を組み合わせた 鮮新世谷川岳花崗岩類の高精度な削剥史 南 沙樹・末岡 茂・Luca C. Malatesta・福田将真・田上高広 -----	26
講演要旨: “神通層群”は必要なのか? 長田充弘・林 芳美・大藤 茂 -----	31
講演要旨: (U-Th)/He 熱年代に基づいた佐渡島の花崗岩類の冷却・削剥史 末岡 茂・福田将真・Kohn, B.P.・田上高広 -----	36
講演要旨: K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定のための鉱物分離について 山崎誠子・宮川歩夢・板木拓也 -----	41
特集: 第19回国際熱年代学会議開催 (Thermo2025) 開催報告 長谷部徳子・現地実行委員会委員 -----	44
特集: Thermo2025 プレ巡検報告 中嶋 徹 -----	51
特集: Thermo2025 中日巡検報告 (Aコース: 福井県立恐竜博物館) 長田充弘 -----	56
特集: Thermo2025 中日巡検報告 (Bコース: 能登半島) 小形 学 -----	59
特集: Thermo2025 中日巡検報告 (Cコース: 金沢市) 長谷部徳子 -----	63
特集: Thermo2025 中日巡検報告 (Dコース: 酒造巡り) 末岡 茂 -----	67
特集: 私が見てきた熱年代学の変遷 田上高広 -----	70
学会記事 -----	74

FISSION TRACK NEWS LETTER**No. 38 (DECEMBER 2025)****FISSION TRACK RESEARCH GROUP IN JAPAN****Extended abstracts of 49th Meeting of the Fission Track Research Group in Japan**

(21- 22 December, 2024: Kyoto University, Kyoto)

Noble gas release and age rejuvenating during co-seismic faulting: analyzed by NGX conversion of the electrical system of VG5400x	
Keiko Sato and Hidenori Kumagai -----	1
Fission-track analysis in monazite by step etching: applying to unknowns including the Antarctica samples	
Hayato Asai, Shoma Fukuda and Takahiro Tagami -----	9
Estimation of the uplift and denudation history of the Chugoku Mountains using (U-Th)/He thermochronology	
Yusuke Asahi, Shoma Fukuda, Shigeru Sueoka, Barry Kohn and Takahiro Tagami -----	13
Verifying the relationship between high-temperature zones of crust and uplift patterns of mountains: A case study of the Iide Mountains	
Shoma Fukuda, Shigeru Sueoka, Toru Nakajima, Barry Kohn and Takahiro Tagami -----	17
Zircon U-Pb, U-Th double dating on the Tateyama volcanic rocks	
Hisatoshi Ito, Toshiya Tanbo and Hajime Iida -----	22
Highly accurate exhumation history combined thermochronology with 1D numerical modelling of heat advection-diffusion production equation	
Saki Minami, Shigeru Sueoka, Luca C. Malatesta, Shima Fukuda and Takahiro Tagami -----	26
Is the name "Jinzu Group" necessary?	
Mitsuhiro Nagata, Yoshimi Hayashi and Shigeru Otoh -----	31
Cooling/exhumation history of granitic rocks in the Sado Island, central Japan, based on (U-Th)/He thermochronometry	
Shigeru Sueoka, Shoma Fukuda, Barry P. Kohn and Takahiro Tagami -----	36
Mineral Separation for K-Ar and ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar dating	
Seiko Yamasaki, Ayumu Miyakawa, Takuya Itaki -----	41
Report on the 19th International Conference on Thermochronology (Thermo2025)	
Noriko Hasebe and Member of Local Working Committee -----	44
Report on the pre-conference field trip of Thermo2025	
Toru Nakajima -----	51
Report on the mid-conference field trip of Thermo2025 (Course A: Fukui Prefectural Dinosaur Museum)	
Mitsuhiro Nagata -----	56
Report on the mid-conference field trip of Thermo2025 (Course B: Noto Peninsula)	
Manabu Ogata -----	59
Report on the mid-conference field trip of Thermo2025 (Course C: Kanazawa City)	
Noriko Hasebe -----	63
Report on the mid-conference field trip of Thermo2025 (Course D: Brewery Tour)	
Shigeru Ogata -----	67
Development of thermochronology in my view	
Takahiro Tagami -----	70
NEWS -----	74

研究ノート (査読あり)

断層試料中の希ガス放出と年代若返り : VG5400 の NGX 化による測定

Noble gas release and age rejuvenating during co-seismic faulting: analyzed by
NGX conversion of the electrical system of VG5400

佐藤佳子^{*,***}・熊谷英憲^{**,***}

Keiko Sato^{*,***} and Hidenori Kumagai^{**,***}

* 帝京大学理工学部総合理工学科, Teikyo University, Faculty of Science and Engineering,
Department of Integrated Science and Engineering

** 学習院女子大学, 国際コミュニケーション学科, Gakushuin Women's College, The
Graduate School of International Cultural Relations

*** 国立研究開発法人海洋研究開発機構海底資源センター, Japan agency for Marine-Earth
Science and Technology (JAMSTEC), Submarine Resources Research Center (SSRC)

Abstract

Noble gases are inert and rarely react with other elements, it is believed that, when the temperature of a mineral rises above its closure temperature, the mineral reaches equilibrium with the surrounding isotopic ratios and experiences "age rejuvenation." Sato et al. (2009) previously reported the isotope ratio measurement of noble gases released in frictional melting experiments as a method to reset the age of model faulted of molten rocks. This corresponds to a co-seismic sliding velocity of 1.6m/s and a stress of 1.4 MPa. In this friction experiment, the maximum temperature (about 1140°C) was reached in less than second sliding began ("*first fuse*"; Hirose and Shimamoto, 2005). The friction surface showed completely molten glass due to the heat of friction. Compared to the melted rock specimen, a large amount of atmospheric argon gas degassed during the "*first fuse*" in the granite experiment; the specimen melted within about five seconds of friction time, and most of the argon gas was released near the fault plane. This volatile gas release may affect atmospheric conditions near faults and the rejuvenation age of source rocks in large earthquakes.

Keywords: K-Ar dating, frictional melting, age rejuvenation, diffusion

1. はじめに

断層面には、シュードタキライトと呼ばれる再溶融しガラス化した岩石が発見されることがある。このガラス化したシュードタキライトは岩石の溶融の痕跡を根拠に、断層すべり等の際に発生した摩

擦熱によって加熱されたと考えられている。断層面に挟まれたメルトは、ガラス化するが、表面の凹凸は意味をなさなくなるため、滑り面が滑らかになると別のメカニズムで摩擦係数が下がっていくようになる。Shimamoto and Tsutsumi

(1994)では、円筒状の岩石試料（斑れい岩）を出発物質として、高速回転させ、滑り面を熔融した場合の摩擦の変位量を求めている。

一方、Hirose and Shimamoto (2005)によれば、この摩擦実験では滑り開始後1秒未満で、first fuse と呼ばれる最大値の1140度に達し、その後完全に熔融したsecond fuseに移り摩擦係数も下がっていくことが実験からわかってきた。Sato et al. (2009a)では、この実験条件にガス雰囲気条件を規定して、閉鎖環境下（closed system）での摩擦熔融実験を行った。力学的条件については、Hirose and Shimamoto (2005)に従い設定し、すべり速度1.6 m/s（co-seismicすべり速度に相当）、応力1.4 MPaで行った。断層面からの2 cm程度の範囲に摩擦による破壊と変成が見られ、数ミリ程度の範囲に摩擦熱編成による年代の若返りが見られ、ガラス化したメルト部分は年代が若返りまたはリセットしていることがわかった。また、この摩擦の際には摩擦熱による岩石から脱ガスしていることがわかり、摩擦熔融の際の短い時間でも大気との平衡にいたる同位体分別のメカニズムに対するヒントを得た。

一方、Zwingmann et al. (2019)によれば、断層粘土鉱物断層ガウジ中の希ガス同位体の放射起源 Ar 成分に注目し、K-Ar 系の同位体年代測定に関し、Ar の拡散の少ない低温領域での外因性の加熱（摩擦熱）について議論している。350°Cまでは外因性のある加熱による年代値に対する放射起源 ^{40}Ar の放出は無視できるとし、地震時よりも低い滑り速度で摩擦滑りが発生した場合、放射起源 ^{40}Ar の損失が約56%に上り、残りの粘土は放射起源 ^{40}Ar の約44%を引き継ぐとし

ている。また、150°C~450°Cでは地震時よりも低い摩擦滑り実験では、放射起源 ^{40}Ar の損失量が増加し、引き継がれる放射起源 ^{40}Ar の量は減少するとまとめているが、粘土鉱物の Ar の保持の問題については言及されていない。

Sato et al. (2009b)では、大気雰囲気ではなく窒素ガスで規定した閉鎖環境下（closed system）での実験を行い、力学的条件については、Hirose and Shimamoto. (2005)に従い、すべり速度1.6 m/s（co-seismicすべり速度に相当）、応力1.4 MPaで、断層摩擦実験を行った。ここでは海底地殻の主要な岩石である斑糲岩類から放出された揮発成分に注目し、岩石に寄与する Ar や He といった、地震の際に放出されるガスにも注目しており、Wakita et al.,(1980)、杉崎・杉浦 (1986)で示されたような、Ar や He の大気放出が断層起源であることを支持する結果となった。

そこで、本研究では、出発物質として大陸地殻の主要な成分である花崗岩類を用いて、新たにモデル断層としての摩擦実験を行い、断層年代の若返りの可能性に関して検討する。

2. モデル断層による摩擦熔融実験

2.1 出発物質 (starting material) の成分

今回のモデル断層実験では、Yuhara et al (2003, 2000)で年代と主要元素が報告されている領家変成帯の庵治地域の花崗岩類を使用している。庵治花崗岩類は中粒~粗粒の普通角閃石黒雲母を含む花崗岩であり、成分的に均質なため石材や実験材料としてよく利用されている。K-Ar年代(黒雲母年代；80.4~79.4 Ma, 角閃石年代；83.5Ma)とされている。実験に用いた庵治花崗岩類は、放射起源 ^{40}Ar の起源となる ^{40}K (カリウム) 由来成分と、

放射起源 ^4He の起源となる ^{238}U , ^{235}U (ウランウム) 由来の成分を含んでいる (Yuhara et al., 2003; 柚原, 2008). Table 1 には Yuhara et al. (2003) で年代値とともに報告されている SR-10 (花崗岩) の主要成分を参照している.

また, Yuhara et al. (2003) では, Rb-Sr 年代としてアイソクロン年代; $82.9 \pm 8.0\text{Ma}$ を決定している (Table 1). 庵治花崗岩類は, K_2O を 3.11% 含み, カリウムが非常に多く, 本研究の摩擦実験への出発物質として適している.

2.2 摩擦実験

希ガスは放出される量も, 大気中の成分量も非常に少ないと予想されるため, 海洋研究開発機構高知コア研究所内の高速摩擦試験機を用いた, 高速摩擦実験では, Fig. 1 のように, 大気成分の混入を避けるために窒素充填状態で閉鎖系での実験を行った. 実験装置内に大気の漏れ込みがないように, 真空装置に使用する O リングと同等のゴム状のシーリングを行った. また, ガスサンプリングについては, 直径 $5\text{mm}\Phi$ のアルミチューブを用いて, 上位部からの注射器による吸引によりアルミチューブを大気に晒さず両端を封じて採取を行った (Fig. 1).

摩擦実験条件については, 実験では, 香川県庵治地区から採取された一対の円筒形花崗岩試料を, すべり速度 1.6 m/s (余震性すべり速度に相当), 1.0 MPa の一定垂直応力を加えた (Table 2). また, 花崗岩類の実験では, 摩擦圧力により石英が相転移を起こし表面が摩擦破壊されるため, 摩擦面をアルミで巻いて囲み表面から飛び散ることを防いだ. 装置内には, 酸素濃度計を設置して, 大気の漏れ込みをリアルタイムでチェックしながら実験を行った.

3. 希ガス同位体分析と揮発成分の分析

採取したガスを封じたアルミチューブを真空ラインの自動クラッシング装置内に封入セットし, 真空内でアルミチューブを押しつぶしてガスの抽出を行った後,

まず, 精製前のガスを四重極質量分析計 (SRS 社製 RGA-200) で測定して, 揮発成分と希ガスの成分の存在度の測定を行い, この結果をもとにその後の高精度測定のためガスの分離精製を行った. その後 Ti-Zr ゲッターを4段で精製し, チャコールトラップでのガス成分の分離を2度行い, 測定可能な真空度に希釈した後, $\text{HD} \cdot \text{He} \cdot \text{Ne} \cdot \text{Ar} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{Kr} \cdot \text{Xe}$ の順に測定を行った. 希ガス同位体分析に関しては, 海洋研究開発機構の希ガス同位体質量分析計 1 号機 GVI-5400HE (YOKOSUKA-MS) を使用した.

また, 2017 年に希ガス同位体質量分析計 2 号機 (KOCHI-MS) の制御電装系を同後継機の NGX 社の電装系へと改変し, デジタル制御での質量分析を実現した. また, 試料の揮発成分のガスを測定するために, この希ガス同位体質量分析計 2 号機 (KOCHI-MS) で, 測定前処理を行えるよう, 質量分析計内の感度の安定化と, 加速電圧と電磁場の測定安定性の向上を図った (Fig. 2).

また, 前位処理真空ラインについてもオンサイトでの試料 (液体もしくは気体) を前処理分析して精製したガスを導入分析できるように改良を行い, 濃度の濃いガスの分析や環境水中のガス抽出などの測定への対応が可能となり, もともと屋外や研究船等でのオンサイト分析にも可能とするために開発した希ガス前処理装置や Ti-Zr ゲッター, ハロゲンゲッター, 硫化ガスゲッターなどを備えた (佐藤・熊谷, 2020; Sato and Kumagai, 2024).

4. 測定結果と考察

花崗岩類の摩擦実験での放出ガスについては, 真空ライン内での Ta 炉での全溶解での測定と異なり, 摩擦熱だけではなく摩擦破砕によるガスも含まれている (Fig. 3).

花崗岩類では, 高速摩擦の際に石英の相転移が起きる可能性があり破壊されやすいため, 斑れい岩類の Sato et al., (2009a;b) での手順に加えて, 摩擦部分を

アルミで囲むなど慎重に摩擦実験を行った。花崗岩の摩擦試験のしやすい実験条件とのことで、応力が斑糲岩類 (1.3N) より、若干低く (1.0N) に設定された。

海洋研究開発機構の希ガス同位体質量分析計での測定の結果として、花崗岩類を用いた当実験では斑れい岩類とは異なり、 ^3He ・ ^4He は短時間では検出されなかった。そのため、もしくは、 He のサイトとなる鉱物が溶けるもしくは破壊するまでには至らなかったか、 ^{36}Ar が大量に存在したため、結果として低い割合に見えている可能性もある (Fig. 3)。

花崗岩類からは Ar が大量に放出されると予想されたが、この予想はあたらなかった。これは、今回実験条件の保持のため、6秒程度で摩擦を終了したため温度が約 800 度を少し超えた程度であることの寄与が大きいと判断している。瞬間的な温度はもう少しあがっている可能性があるが、今回は光温度計での測定ではないため、また、岩石内の熱伝導率の問題で時間分解能にける可能性もある。

^{22}Ne , ^{40}Ar , CO_2 に関しては、 ^{36}Ar に対し斑れい岩類より割合として少なくなっている。含水鉱物の雲母や角閃石由来と考えられる水素や水蒸気は多く、おそらくは、水蒸気のサイトとなる雲母や角閃石から分解等により斑れい岩類より多くのガスが放出したと考えられることと整合的である (Fig. 3)。

一般的に花崗岩類に含まれるウラン鉱物 (ジルコン・アパタイト) などに由来する壊変および核分裂生成起源の ^{84}Kr , ^{86}Kr , ^{129}Xe , ^{132}Xe などは、斑れい岩類に比べ若干多くなっている。そのため、岩石の主成分鉱物の影響が放出ガスの成分に影響すること、また、花崗岩が摩擦で全溶融までの温度には至らず、部分溶融にとどまったことなどが考えられる。

Zwingmann H. (2019)らの実験のように断層面が完全に粘土鉱物化してしまっていれば、温度が 300-400 度程度と低くても、鉱物のアルゴン保持サイトの閉鎖

温度もしくは Ar の保持力が低いため、 Ar が拡散により放出されやすいと考えられる。今回の実験には粘土鉱物に変質する前の雲母や角閃石が、 ^{36}Ar に比べて ^{40}Ar を保持するサイトを比較的に保っていることを支持するものである。また、希ガスの拡散実験 (e.g. Ozima and Podosec, 2000) のように、ある程度の高温が維持された状態の実験のように、温度条件を一定にして比較的長い時間の拡散時間が必要であるため、摩擦溶融実験を 30 秒程度行って全溶融を確認する必要があると考えている。しかしながら、斑れい岩類のように 30 秒程度溶融した場合について、単純計算での 6 倍程度ではなく、更に多くの希ガスが放出されると考えられる。これは、SEM 画像上で識別できる 1~2 mm 程度反応している部分 (Fig. 1) が断層面と見做せる場合については、Sato et al., (2009a)で議論されているように摩擦熱による反応範囲が 10~30 mm に及べば、摩擦熱の保持時間によっては、年代を数%若返らせる可能性がある。また、放出ガスを溶融部ないし破砕部が取り込めば過剰 Ar となり年代が古くなることも有り得る。断層の深度によって、断層の摩擦熱の影響、大気との拡散・混合による度合いによる年代の若返りなどや古くなるなどの異常が出るのではないかと考えられる。

5. まとめ

今回のモデル断層を用いた摩擦実験では、少なくとも希ガス放出において斑れい岩類の結果と花崗岩類の元素組成が異なっており、これは岩石の成分由来の希ガス成分が大気との平衡になる過程で摩擦熱による同位体分別と放出ガスの固結などにより、若返りや過剰アルゴンなどの年代異常に影響する可能性が窺われた。

大陸地殻に多く存在する花崗岩類の⁴⁰Ar (放射起源 Ar を含む) は年代測定にあたって過剰アルゴンとなる可能性があり, 地下深くにおいて摩擦による溶融が起これば, 基盤岩から放出されるガスが大気中に放出されるか, 断層内にとどまるかで年代異常の現れ方が異なる可能性がある。

さらに, カリウムを多く含む花崗岩類とそうではない斑れい岩類とでは, 摩擦試験条件が同様でも断層面の溶融度合いが異なるため, 断層運動中に⁴⁰Ar の放出が岩質ごとに異なる可能性を示している。

6. 謝辞

本研究では分析測定を進めるに当たり, 現: 高知コア研究所所長の廣瀬丈博博士及びスタッフの協力により海洋研究開発機構高知コア研究所の高速摩擦試験機, 並びに, SEM を使用させていただいた。本研究を進めるに当たり, 実験当時の所属の海洋研究開発機構横須賀本部のスタッフの方々に感謝の意を表するとともに, 特に鈴木勝彦博士, 羽生毅博士, 田村肇氏, 清水家齊氏よりいただいたご助力に感謝の意を表する。

引用文献

- Hirose, T. and Shimamoto, T., 2005, Growth of molten zone as a mechanism of slip weakening of simulated faults in gabbro during frictional melting. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **110**, 1-18.
- Ozima M. and Podsec F. A., 2002, Noble Gas Geochemistry (2nd edition), Cambridge (Cambridge University Press), 300 pp., ISBN 05 2180 3667.
- Sato, K., Hirose, T., Tamura, H., Kumagai, H., Mizoguchi, K., 2009b, Volatile gas analysis released from simulated faults during frictional melting. *JAMSTEC Research, IFREE Special issue*, 51-57.
- Sato, K., and Kumagai, H., 2024, Preprocessing apparatus and method for gas analysis. International patent (EU) , Patent no. : EP3176578.
- 佐藤佳子, 熊谷英憲, 2020, ガス分析用前処理装置及びガス分析前処理方法. 特許第 6765117 号.
- Sato, K., Kumagai, H., Hirose, T., Tamura, H., Mizoguchi, K., Shimamoto, T., 2009a, Experimental study for noble gas release and exchange under high-speed frictional melting. *Chemical Geology*, **266**, 96-103.
- 杉崎 隆一, 杉浦 孜, 1986, 長野県西部地震に伴う温泉ガス, 火山ガスの前兆的組成変動 --地殻歪および岩石破壊と地下ガス組成変動--. *地震*, **39**, 99-109.
- 柚原雅樹, 2008, 讃岐領家変成帯, 庵治花崗岩の微量元素ならびに希土類元素組成. *福岡大学理学集報*, **38**, 45-51.
- Yuhara M., Kagami, H., Nagao, K., 2000, Geochronological characterization and petrogenesis of granitoids in the Ryoke belt, Southwest Japan Arc: constraints from K-Ar, Rb-Sr and Sm-Nd systematics. *Island Arc*, **9**, 64-80.
- Yuhara, M., Miyazaki, T., Kagami, H., and Yuhara., M. 2003, Rb-Sr and K-Ar geochronology and petrogenesis of the Aji Granite in the eastern Sanuki district, Ryoke Belt, southwest Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **98**, 19-30.
- Wakita, H., Nakamura, Y., Kita, I., Fujii, N., Notsu, K., 1980, Hydrogen Release: New Indicator of Fault Activity. *Science*, **210**, 188-190.
- Zwingmann, H., den Hartog, S. A.M., Todd, A., 2019, The effect of sub-seismic fault slip processes on the isotopic signature of clay minerals--Implications for K-Ar dating of fault zones. *Chemical Geology*, **514**, 112-121.

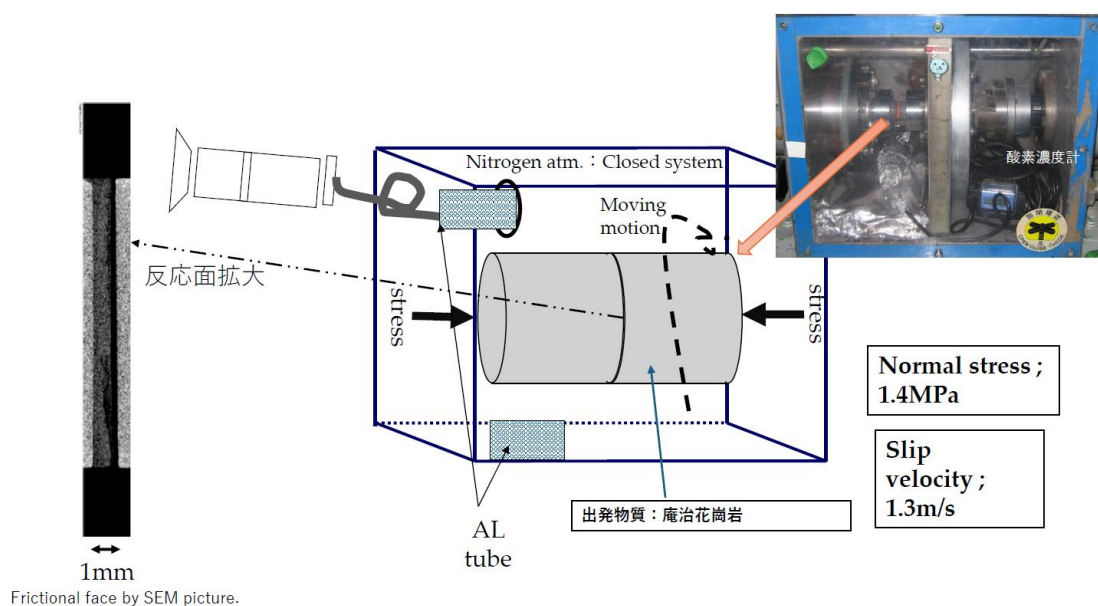


Fig. 1 窒素雰囲気中での摩擦加熱実験と放出ガス回収



Fig. 2 海洋研究開発機構の2017年にNGX化したGVI-5400HE希ガス同位体質量分析計の電装系

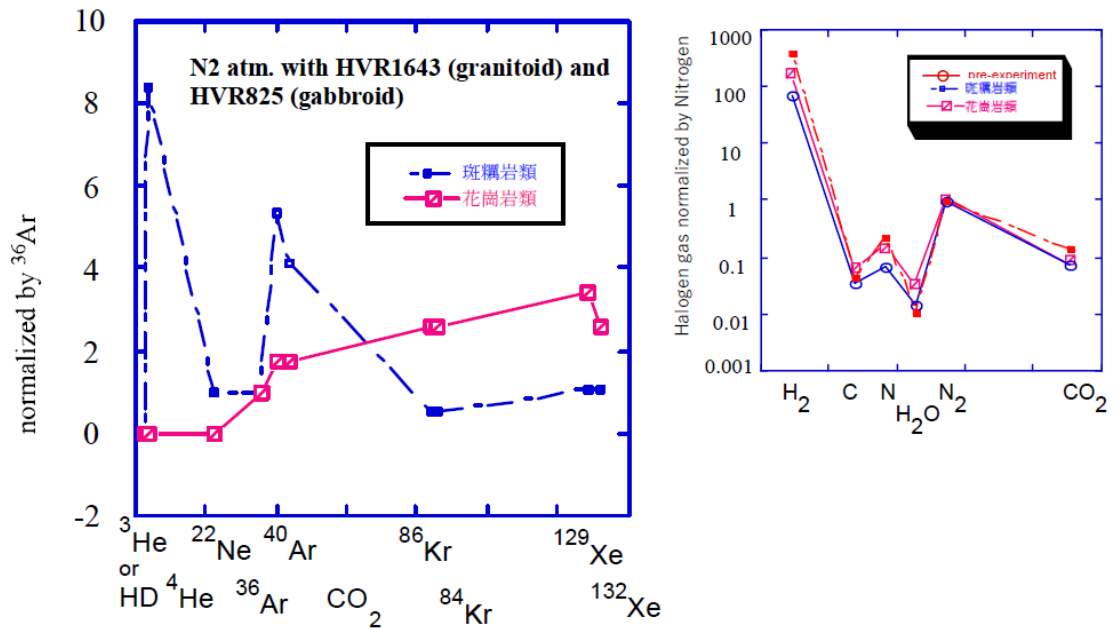


Fig.3 斑れい岩類 VS 花崗岩類の窒素雰囲気中で摩擦溶融実験の放出ガスの結果 (斑れい岩類、Pre-experiment ; Sato et al., (2009b), 花崗岩類 ; 本稿)

Table 1

主要元素	花崗岩類	斑れい岩類
SiO_2	70.21	52.60
TiO_2	0.35	1.00
Al_2O_3	14.45	13.30
FeO^*	2.68	14.20
MnO	0.06	0.20
MgO	0.83	6.00
CaO	2.94	10.40
Na_2O	3.39	2.30
K_2O	3.11	0.70
P_2O_3	0.08	0.20
Total	98.10	100.90

Table 1 実験に用いた花崗岩 (庵治) の平均化学組成と斑れい岩 (ジンバブエ) の化学組成

Footnote:

花崗岩 : Yuhara et al., 2003, Table 1: SR-10

斑れい岩 : Sato et al., 2009a, Table 2: Starting material

Table 2

Run No.	岩質	滑り速度 m/s	ノーマルストレス Mpa	短縮された距離 mm	実験時の気体雰囲気 最大温度 (°C)
825	斑れい岩		1.3	1.4	5.56 closed Nitrogen
1643	花崗岩		1.3	1.0	closed 0.92 Nitrogen

Table 2 モデル断層摩擦実験時のコンディション

Footnote:

花崗岩 : Yuhara et al., 2003, Table 1: SR-10

斑れい岩 : Sato et al., 2009a, Table 2: Starting material

Table 3

Purified	Mass No.	pre-experiment under N ₂ atmosphere ppm/atm	pre-experiment under N ₂ atmosphere ppm/atm	pre-experiment under N ₂ atmosphere ppm/atm
HD	3	3.0	n.d.	0.00E+00
⁴ He	4	3.0		25.6 2.82E-05
²² Ne	22	1.5		3.0 6.82E-04
³⁶ Ar	36	3.0		3.0 6.82E-04
⁴⁰ Ar	40	12.3		16.2 1.37E-03
CO ₂	44	4.6		12.4 1.37E-03
⁸⁴ Kr	84	1.5		1.5 2.06E-03
⁸⁶ Kr	86	n.d		1.5 2.06E-03
¹²⁹ Xe	129	1.5		2.1 2.75E-03
¹³² Xe	132	1.5		3.1 2.06E-03

Table 3 実験時のガス雰囲気と放出されたガスの分析結果

段階エッチングによるモナザイトのフィッション・トラック分析 —南極を含む複数の未知試料への適用—

Fission-track analysis in monazite by step etching: applying to unknowns including the Antarctica samples

浅井勇人*・福田将真**・田上高広*

Hayato Asai*, Shoma Fukuda**, Takahiro Tagami*

*：京都大学, Kyoto University

**：日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

はじめに

近年、新たな熱年代計としてモナザイトフィッション・トラック (MFT) 法の基礎研究が行われている (Jones et al., 2019)。MFT法は既存の手法に比べてより低い閉鎖温度 (<50°C) を持つことが期待されており (Weise et al., 2009; Jones et al., 2021)、地殻表層における熱史解明への有用性が期待されている。しかし、エッチングの終了条件の確立、アニーリング特性の解明、初期長の決定など、依然として課題も多く実用化には至っていない。また、FT長の測定例の数は少なく (Jones et al., 2023; Jepson et al., 2025)、対象となった試料の形成年代も原生代、白亜紀、始新世と限られている。そこで本研究では、モナザイトにおけるエッチング特性およびアニーリング特性の理解に向けて、様々な形成年代を持つ天然のモナザイトを対象に段階エッチングを行い、自発トラックの長さ分布の測定及び比較を実施した。

分析試料と実験手法

本研究では、南極から採取されたカンブリア紀のペグマタイト (ARP04)、同じく南極から採取された先カンブリア紀の斜長石花崗岩 (LANG1)、屋久島から採取された中期中新世の花崗岩 (YYG02) から分離したモナザイトを用いる。

エッチングは、6MのHClを用いて

90°Cで行った (Jones et al., 2019)。

Nakajima et al. (2024)を参考に、温度管理にはウォーターバスを使用し、各試料ごとに適当なタイムステップでエッチングを区切る段階エッチングを行った。エッチング後の粒子の観察およびFT長の測定には、Autoscan Systems製のTrackscan Plus Professionalを用いた。日本原子力研究開発機構東濃地科学センターにて試料の前処理、研磨、段階エッチングおよび画像撮影を行い、撮影した画像を用いてFT長の測定を京都大学にて行った。FT長の測定は、全て表面トラックと交差しているconfined track (TINT: Track in Track)を対象として行った。

結果と考察

段階エッチングによるFT長の時間変化を図1に示す。ARP04では、ほとんどのFTにおいて、30~45分でのFT長の増加率よりも45~60分での増加率の方が小さくなった。LANG1のFT長の時間変化は、ARP04の45~60分での時間変化とよく似てほとんど増加しない結果となった。また、YYG02では150~180分での増加率より180~210分での増加率の方が小さくなった。このような段階エッチングによるFT長の時間変化については、アパタイトにおける先行研究で報告されるように、FTの終端までエッチングされるとFT長の時間変化率は著しく低下し、その後徐々に成長を続けることが分

かっている（例えば，Tagami and O'Sullivan, 2005）．モナザイトでも同様のエッチング特性を示すことを仮定すると，TINT に対しては，ARP04 と LANG1 では 45～60 分，YYG02 では 180～210 分が適当なエッチング時間である可能性がある．また，形成年代が古いほどより長いエッチング時間を要する結果となった．この結果は，化学組成に試料間で差がないことを仮定すると，Nakajima et al. (2024)で提案された放射線損傷の蓄積量とエッチング時間の関係と整合的なものとなっている．

図 2 に各試料でのエッチングの最終段階における FT 長分布を示す．ARP04 と LANG1 は共に単峰性の短い方に裾が伸びた形状を示した．このような形状は，アパタイトなどでは，試料が PAZ 付近での徐冷を経験したと解釈される．YYG02 は，単峰性に近い形状を示してはいるものの，測定した FT の本数が少ないため不明瞭な分布となった．既往研究では，FT 長の測定は Jones et al. (2023)と Jepson et al. (2025)で報告されており，これらの結果と比較すると，平均長が Jones et al.(2023)よりわずかに長く，Jepson et al. (2025)よりわずかに短い結果となった．エッチングの基準が統一されておらず正確な比較はできないものの，おおよそ先行研究と整合的な分布を示した．また，これらの先行研究では，MFT 年代値の計算において，仮の初期長として Jones et al. (2021)で計算された ^{252}Cf の平均トラック長 $10.6\ \mu\text{m}$ を使用している．しかし，今回の結果では $10.6\ \mu\text{m}$ を超える FT がいくつも観察されており，モナザイトにおける自発 FT の初期長は $10.6\ \mu\text{m}$ よりも長い可能性が高い．ただし，今回は FT の幅の測定をしていないため，厳密な比較はできないことに留意したい．

今後は，FT の幅と密度の測定やエッチングの時間ステップを増やすことにより，より厳密にエッチングの終了条件を決めていく必要がある．

謝辞

本研究は，資源エネルギー庁受託事業の「令和 6 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業」の成果の一部を使用した．また，本研究に使用した南極の試料は金沢大学の長谷部徳子教授および富山大学の石川尚人教授より，屋久島の試料は徳島大学の安間了教授よりご提供いただいた．

引用文献

- Jepson, G., Carrapa, B., Jones, S., Kohn, B. P., Gleadow, A. J. W., George, S. W. M., Howlett, C. J., Gallagher, K., Frickenstein, A. N., Gehrels, G., Triantafyllou, A., 2025, An assessment of monazite fission-track thermochronology as a proxy for low-magnitude cooling, Catalin-Rincon Metamorphic Core Complex, AZ, USA. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **26**, e2024GC011881.
- Jones, S., Gleadow, A., Kohn, B., 2021, Thermal annealing of implanted 252 Cf fission tracks in monazite. *Geochronology*, **3**, 89-102.
- Jones, S., Gleadow, A., Kohn, B., Areddy, S.M., 2019, Etching of fission tracks in monazite: An experimental study. *Terra Nova*, **31**, 179-188.
- Jones, S., Kohn, B., Gleadow, A., Skrzypek, E., Tagami, T., 2023, Low-temperature thermochronology of Ryoke belt granitoids, SW Japan: New insights into the recent cooling history from monazite fission-track dating. *Tectonophysics*, **864**, 229998.

Nakajima, T., Fukuda, S., Sueoka, S.,
Niki, S., Kawakami, T., Danhara, T.,
Tagami, T., 2024, Inverse correlation
between radiation damage and
fission-track etching time on
monazite. *Geochronology*, **6**, 313-323.

Tagami, T. and O'Sullivan, P. B., 2005,
Fundamentals of fission-track
thermochronology. *Reviews in
mineralogy and geochemistry*, **58**, 19-47

Weise, C., van den Boogaart, K. G.,
Jonckheere, R., Ratschbacher, L.,
2009, Annealing kinetics of Kr-tracks
in monazite: Implications for fission-
track modelling. *Chemical Geology*,
260, 129-137.

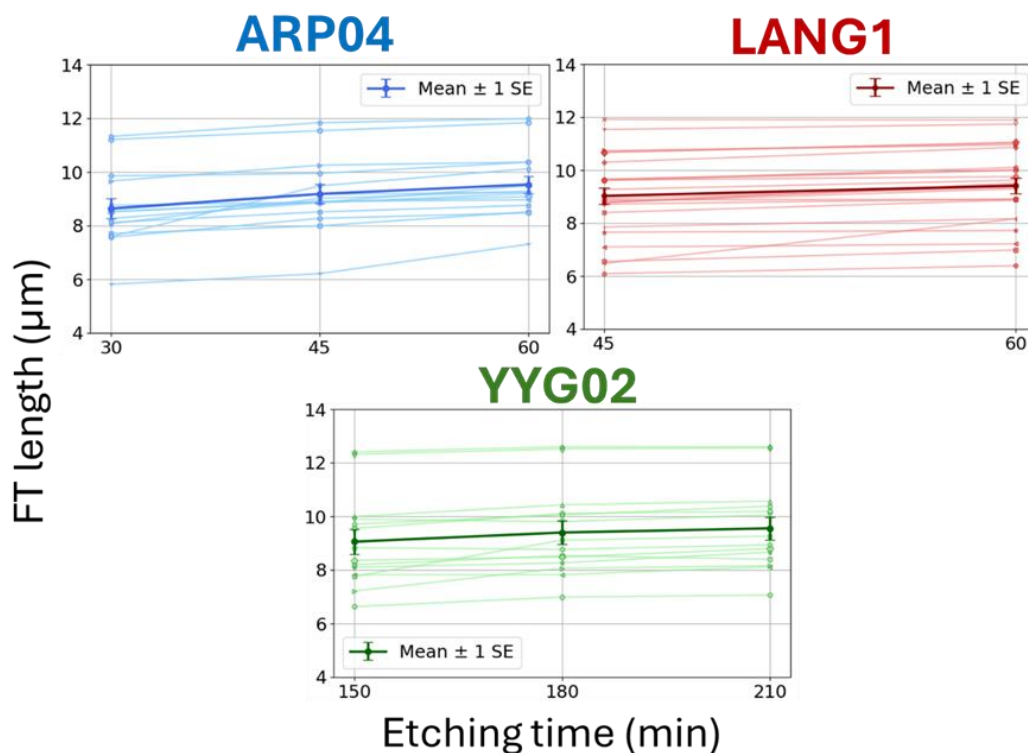


図1 各試料における FT 長のエッチング時間による変化

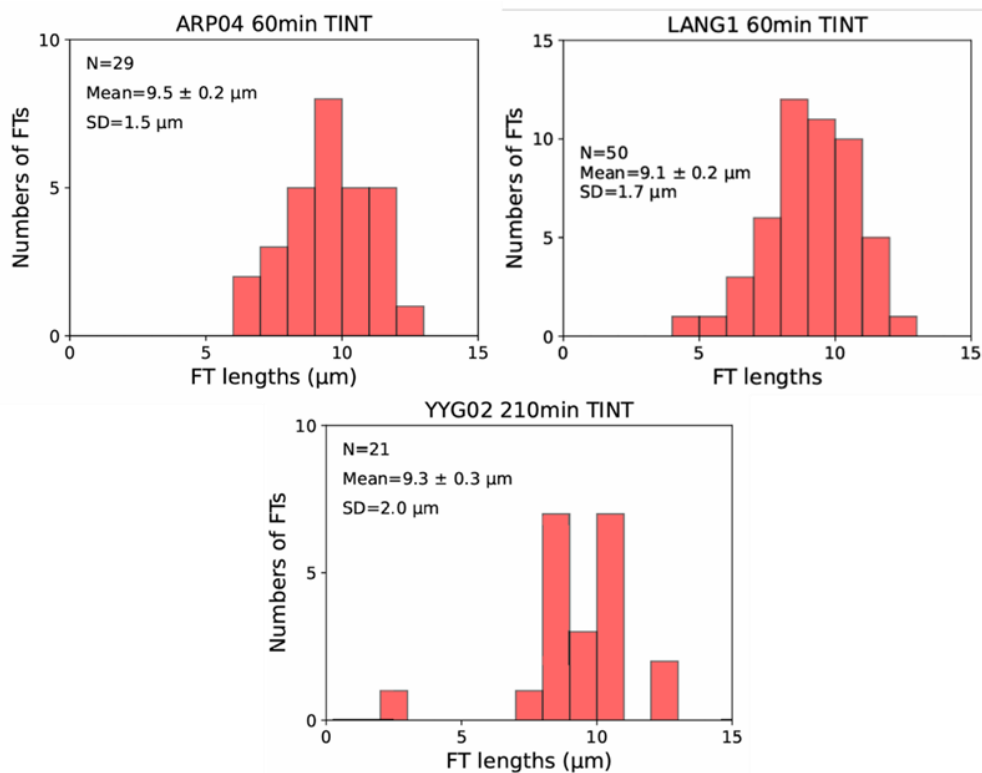


図2 各試料におけるエッチングの最終段階での FT 長分布

(U-Th)/He 熱年代学を用いた中国山地の隆起・削剥史の推定

Estimation of the uplift and denudation history of the Chugoku Mountains using (U-Th)/He thermochronology

旭 祐輔*・福田将真**・末岡 茂**・Barry Kohn***・田上高広*

Yusuke Asahi*, Shoma Fukuda**, Shigeru Sueoka**,

Barry Kohn*** and Takahiro Tagami*

* : 京都大学, Kyoto University

** : 日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

*** : メルボルン大学, Melbourne University

はじめに

中国山地は、西南日本弧の火山弧に沿って分布する島弧平行方向の山地であり、中国地方の分水界をなす。中国山地に点在する侵食小起伏面と新・古第三系の分布に基づくと、中国山地南部の吉備高原周辺は、中期中新世の日本海拡大以降、大きな隆起・沈降や変位・変形を受けず現在に至ったと指摘されている（田中・鈴木，2021）。一方、吉備高原の一部には中期中新世の海成層が残存することから、中国山地の本格的な隆起はそれ以降と考えられる（田中・鈴木，2021）が、その隆起過程・隆起メカニズムは未解明である。隆起要因としてはフィリピン海プレートの沈み込み（中嶋，2018）、断層活動（多井，1975）、マグマの底付け（乙藤，2021）などが提案されているが、詳細なメカニズムは未だ明らかではない。そこで本研究では、地質時間スケールの隆起・削剥史を推定可能な熱年代学を中国山地に適用した。

研究手法

熱年代学とは、放射年代測定法と鉱物固有の閉鎖温度を利用して岩石・鉱物の温度-時間履歴を復元する学問領域である（末岡・田上，2019）。地下深部で形成された岩体上昇・削剥により冷却したと仮定すると、得られた熱履歴を「地

温勾配が一定」等の仮定を置くことによりその地点の削剥履歴に読み替えることができる。本研究では、中国山地中部

（広島～島根県）を横断する測線上で採取した岩石から分離したアパタイトおよびジルコンに対し、低温領域の熱年代法である(U-Th)/He法（以下、He法）を適用した。これにより、アパタイトHe法（AHe法：閉鎖温度55～80℃；Farley, 2000）とジルコンHe法（ZHe法：閉鎖温度160～200℃；Reiners et al., 2004）の温度範囲における熱履歴を制約できると期待される。

熱年代測定結果と解釈

ZHe年代（n=9）は74.3～15.1 Ma、AHe年代（n=6）は41.0～12.7 Maを示した。ZHe年代は、Iida et al. (2015) が報告したジルコンU-Pb年代（花崗岩の固結年代を近似）と同様に北ほど若くなる傾向を示すが、年代値の減少傾向はZHe年代の方が急であり、花崗岩の固結年代差だけでは説明できない（Fig. 1）。またAHe年代も概ね南から北へ若返る傾向を示し、特に島根県北部・安来市～広島県北部・庄原市の試料では25.2～12.7 Maと、日本海の拡大開始時期（約21～15 Ma；星，2018）と同程度か有意に若い年代が得られた。これら若い年代の解釈としては、①後期新生代

の火山岩クラスター (Nguyen et al., 2020) に近接していることから、火成活動による局所的再加熱が年代を若返らせた可能性、②中期中新世以降の中国山地の急速な隆起・削剝に起因する可能性の二つが考えられる。最北端地点では AHe 年代と ZHe 年代が誤差範囲で一致する (Fig. 1) ため、①の再加熱説がより整合的と考えられる。

今後の展望

現測線より西側 (島根・広島県) で、火山岩クラスター分布域を避けた追加試料の熱年代測定を行い、隆起・削剝のみを反映した年代パターンを取得することで隆起過程を検討する予定である。また、今回の試料についてアパタイトフィッション・トラック法を適用し、火成活動による再加熱と削剝による単調冷却を判別する予定である。

謝辞

本研究は科研費若手研究「西南日本弧における熱年代学的研究：南海トラフ大地震のメカニズム解明を目指して」(課題番号：21K14021, 代表：福田将真) の成果の一部である。(U-Th)/He 分析に際し、Abaz Alimanović 氏の多大な技術支援に感謝する。

引用文献

- Farley, K. A., 2000, Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **105**, 2903-2914.
- 後藤 篤, 2001, 日本列島の隆起準平原の平坦化の時期：フィッション・トラック年代学からのアプローチ. *科学研究費助成事業報告書*, 10440144.
- 星 博幸, 2018, 中新世における西南日本の時計回り回転. *地質学雑誌*, **124**, 675-691.
- Iida, K., Iwamori, H., Orihashi, Y., Park, T., Jwa, Y.-J., Kwon, S.-T., Danhara, T., Iwano, H., 2015, Tectonic reconstruction of batholith formation based on the spatiotemporal distribution of Cretaceous–Paleogene granitic rocks in southwestern Japan. *Island Arc*, **24**, 205-220.
- Iwano, H., Orihashi, Y., Hirata, T., Ogasawara, M., Danhara, T., Horie, K., Hasebe, N., Sueoka, S., Tamura, A., Hayasaka, Y., Katsube, A., Ito, H., Tani, K., Kimura, J.-I., Chang, Q., Kouchi, Y., Haruta, Y., Yamamoto, K., 2013, An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as a secondary U–Pb dating standard. *Island Arc*, **22**, 382-394.
- 中嶋 健, 2018, 日本海拡大以来の日本列島の堆積盆テクトニクス. *地質学雑誌*, **124**, 693-722.
- Nguyen, T. T., Kitagawa, H., Pineda-Velasco, I., Nakamura, E., 2020, Feedback of slab distortion on volcanic arc evolution: Geochemical perspective from late Cenozoic volcanism in SW Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **125**, e2019JB019143.
- 岡本 晃, 2023, 低温領域の熱年代学に基づく四国山地の削剝史の推定. 京都大学修士論文.
- Okudaira, T., Hayasaka, Y., Himeno, O., Watanabe, K., Sakurai, Y., Ohtomo, Y., 2001, Cooling and inferred exhumation history of the Ryoke metamorphic belt in the Yanai district, south-west Japan: Constraints from Rb–Sr and fission-track ages of gneissose granitoid and numerical modeling. *Island Arc*, **10**, 98-115.
- 乙藤洋一郎, 2021, MMCO 時期以降の吉備高原の隆起量の推定：削剝量にもとづいて. *地質技術*, **11**, 5-17.

- Reiners, P. W., Spell, T. L., Nicolescu, S.,
Zanetti, K. A., 2004, Zircon (U-Th)/He
thermochronometry: He diffusion and
comparisons with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating.
Geochimica et Cosmochimica Acta, **68**, 1857-
1887.
- 末岡 茂・田上高広, 2019, 低温領域の熱年
代学の原理と地殻浅部のテクトニクスへ
の応用. *地学雑誌*, **128**, 707-730.
- 多井義郎, 1975, 中新世古地理からみた中国
山地の準平原問題. *地学雑誌*, **84**,
133-139.
- 田中元・鈴木茂之, 2021, 新・古第三系の分
布に着目した岡山県中西部における吉備
高原地域の地形特性. *岡山大学地球科学
研究報告*, **27**, 19-27.
- Yuhara, M., Ohira, H., Owada, M., Kamei, A.,
Kagami, H., 1999, Geochronological
study of the Habu Granodiorite in the
eastern Yamaguchi Prefecture,
Southwest Japan. *Memoirs of the
Geological Society of Japan*, **53**, 323-331

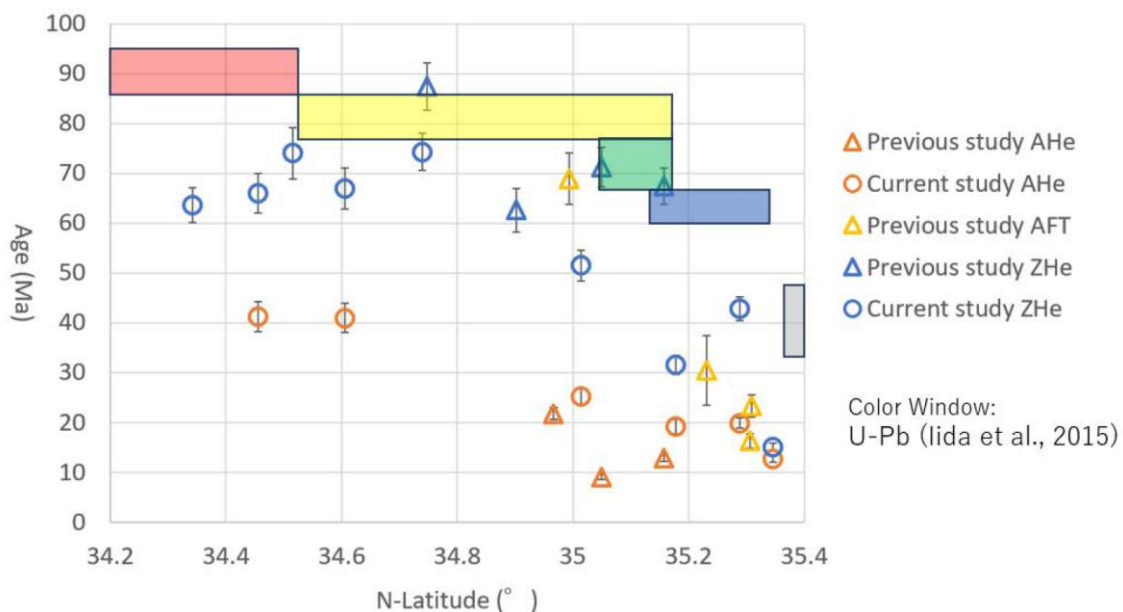


Fig. 1 N-latitude vs. thermochronological age plot combining previous data with new results from this study (The error bars represent 2σ). Horizontal color windows represent for U-Pb dates in Iida et al. (2015). Previous data from Okamoto (2023), Goto (2001), Iwano et al. (2013), Okudaira et al. (2001) and Yuhara et al. (1999).

地殻の高温領域と山地の隆起形態の関連性：飯豊山地における事例 Verifying the relationship between high-temperature zones of crust and uplift patterns of mountains: A case study of the Iide Mountains

福田将真*¹・末岡 茂*¹・中嶋 徹*^{1,2}・Barry Kohn*³・田上高広*⁴
Shoma Fukuda*¹, Shigeru Sueoka*¹, Toru Nakajima *^{1,2},
Barry Kohn*³ and Takahiro Tagami*⁴

*¹ : 日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

*² : 富山大学, University of Toyama

*³ : メルボルン大学, University of Melbourne

*⁴ : 京都大学, Kyoto University

はじめに

東北日本弧は、太平洋プレートの沈み込み帯に形成された島弧で、活発な地殻変動や火山・火成活動で特徴付けられる。東北日本弧の火山弧より背弧側には、第四紀火山が指状のクラスターとして分布していることが知られ、マントルウェッジ中の高温の上昇流の分布 (Hot finger: Tamura et al., 2002) とよく対応する。この高温の上昇流は、背弧側の上部マントルから火山フロント直下の下部地殻にかけて連続的に浅くなっていき

(Hasegawa et al., 2005)、これら地域の第四紀火山の分布域とよく対応することから、火山活動の原因となるメルトの供給源だと考えられている。第四紀火山の周辺では、高い地温勾配や、地震発生層の下限深度の浅部化、P波減衰領域の分布が見出されており、浅部地殻における高温流体の賦存域の存在が推定されている (例えば、芝崎・篠島, 2019)。

一方でホットフィンガー上にありながらも、第四紀火山が分布しない地域も存在する。その一例である飯豊山地は、電磁探査や地震波トモグラフィーの結果および、高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比の温泉の湧出から、地下にマグマと考えられる高温流体の存在が推定されている (例えば、Umeda et al., 2006; 2007)。本研究では、飯豊山地

の隆起メカニズムと地下の高温流体の関係について検討するため、山地横断方向に数 km 間隔で白亜紀～古第三紀花崗岩を採取し (図 1)、低温領域の熱年代法を適用することで、熱年代値の空間的傾向と高温領域の対応関係の検証を試みた。

熱年代測定結果

本研究では、約 $60^\circ\text{C}\sim 200^\circ\text{C}$ の閉鎖温度を有する低温領域の熱年代法を適用した。具体的には、アパタイト(U-Th-Sm)/He法、アパタイトフィッション・トラック法、ジルコン(U-Th)/He法 (以下、順に、AHe法、AFT法、ZHe法) である。先行研究で報告されている各 1 点の AHe 年代 (3.4 ± 0.7 Ma) および AFT 年代 (4.6 ± 0.7 Ma) (Fukuda et al., 2019) (以降、誤差範囲は 2σ 表記) に、本研究で新たに得られた年代値を加えると、 $33.7 \pm 2.1 \sim 2.7 \pm 0.2$ Ma ($n = 12$) の AHe 年代、 $39.2 \pm 7.8 \sim 3.6 \pm 3.0$ Ma ($n = 3$) の AFT 年代、 $43.2 \pm 3.1 \sim 4.4 \pm 0.3$ Ma ($n = 10$) の ZHe 年代が得られた。

解釈と地質学的知見

これらの熱年代データの東西断面における空間的傾向に着目すると、山地中央

に向かって年代値が減少する傾向がみられた(図2)。山麓の逆断層による傾動隆起の場合、木曾山脈での既往研究

(Sueoka et al., 2012)のように、年代値は逆断層が分布する山麓に向かって減少する傾向を示すはずであり、本研究の結果と逆の傾向となる。むしろ、奥羽脊梁山地の南部(Fukuda, 2020)や南部フォッサマグナ・関東山地(Sueoka et al., 2022)と同様に、山地中央に向かって年代値が減少するパターンと類似している。いずれも第四紀火山を含む山地であることから、ドーム状の隆起パターンは、高温領域に変形が集中した結果生じる隆起形態である可能性が考えられる。したがって、飯豊山地も同様に、ドーム状に隆起している可能性が推定された。

東北日本弧の山地の隆起メカニズムについては、近年、温度構造とレオロジーを仮定した地球物理学的モデリングが報告され、奥羽脊梁山地の現地形の分布や形成過程は、東西圧縮応力場において火山フロントに沿った高温領域に応力が集中したことで説明されることが示された(Shibazaki et al., 2016)。飯豊山地におけるドーム状隆起を示唆する熱年代分布は、深畑ほか(2022)で議論されているように、高温領域の分布は火山・火成活動のみならず、歪が集中する場とも関連するという仮説を補強する結果となった。

また、年代が山地中央部方向への減少を示す領域は、地磁気地電流法で推定された低比抵抗領域(Umeda et al., 2006)と概ね同様の範囲で観察された(図2)。すなわち、高温領域の分布範囲においては、地質時間スケールで隆起・削剥が卓越していた可能性を支持する。熱年代学に基づく地質学的スケールの隆起パターンと現在のスナップショットである地球物理学的観測に基づく高温領域の分布範囲に関連性があると仮定すれば、本地域では少なくとも約3 Ma以降から高温領域が現在とほぼ同じ位置に安定に存在していたのかもしれない。今後は飯豊山地における更なる熱年代データの拡

充に加え、高温流体の賦存域を有する他の非火山性山地の隆起・削剥についても情報収集を進めたい。

謝辞

本報告は「令和6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(JPJ007597)(地質環境長期安定性総合評価技術開発)」で得られた成果の一部を使用した。サンプリングにおいては、東濃地科学センターの小松哲也博士、京都大学大学院理学研究科の工藤駿平氏、(株)アルティメックの岩田君彦氏にお世話になった。感謝申し上げます。

引用文献

- Hasegawa, A., Nakajima, J., Umino, N., Miura, S., 2005, Deep structure of the northeastern Japan arc and its implications for crustal deformation and shallow seismic activity. *Tectonophysics*, 403, 59-75.
- 深畑幸俊・岡崎智久・西村卓也, 2022, GNSS データに基づく日本列島の歪み速度場と島弧間および島弧内変動. *地学雑誌*, 131, 479-496.
- Fukuda, S., Sueoka, S., Hasebe, N., Tamura, A., Arai, S., Tagami, T., 2019, Thermal history analysis of granitic rocks in an arc-trench system based on apatite fission-track thermochronology: A case study of the Northeast Japan Arc. *Journal of Asian Earth Sciences*: X, 1, 100005.
- Fukuda, S., 2020, Thermochronometric investigations of the northeast Japan Arc. Doctoral theses of Kyoto University.

- Shibazaki, B., Okada, T., Muto, J., Matsumoto, T., Yoshida, T., Yoshida, K., 2016, Heterogeneous stress state of island arc crust in northeastern Japan affected by hot mantle fingers. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **121**, 3099-3117.
- 芝崎文一郎・篠島僚平, 2019, 不均質レオロジー構造を考慮した島弧地殻における変形と応力場のモデル化. *地学雑誌*, **128**, 813-834.
- Sueoka, S., Kohn, B. P., Tagami, T., Tsutsumi, H., Hasebe, N., Tamura, A., Arai, S., 2012, Denudation history of the Kiso Range, central Japan, and its tectonic implications: Constraints from low-temperature thermochronology. *Island Arc*, **21**, 32-52.
- Sueoka, S., Kobayashi, Y., Fukuda, S., Kohn, B. P., Yokoyama, T., Sano, N., Hasebe, N., Tamura, A., Morishita, T., Tagami, T., 2022, Low-temperature thermochronology of active arc-arc collision zone, South Fossa Magna region, central Japan. *Tectonophysics*, **828**, 229231.
- Tamura, Y., Tatsumi, Y., Zhao, D., Kido, Y., Shukuno, H., 2002, Hot fingers in the mantle wedge: new insights into magma genesis in subduction zones. *Earth and Planetary Science Letters*, **197**, 105-116.
- Umeda, K., Asamori, K., Negi, T., Ogawa, Y., 2006, Magnetotelluric imaging of crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline mountains in a nonvolcanic region, northeast Japan. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **7**.
- Umeda, K., Asamori, K., Ninomiya, A., Kanazawa, S., Oikawa, T., 2007, Multiple lines of evidence for crustal magma storage beneath the Mesozoic crystalline Iide Mountains, northeast Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **112**.

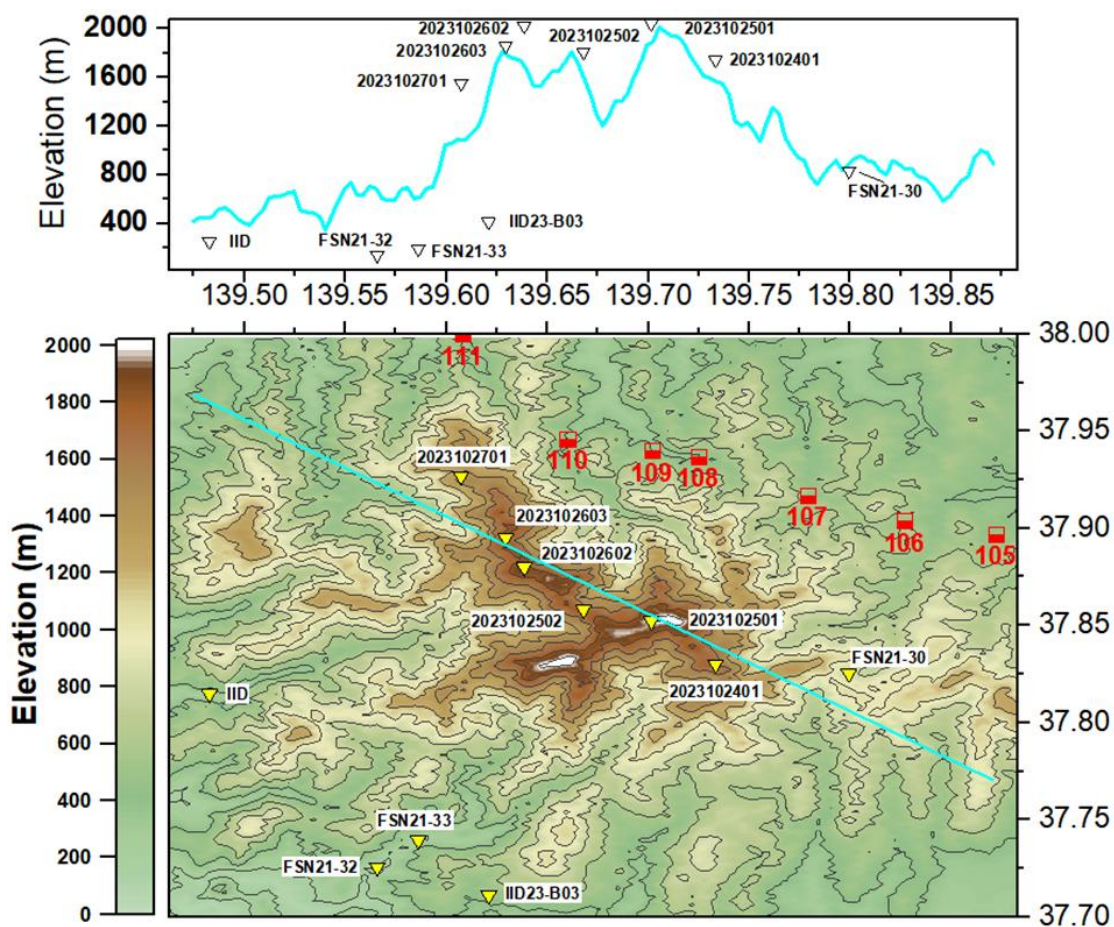


図1 飯豊山地における試料採取地点および標高プロファイル。
 国土地理院発行の50mメッシュ数値標高モデルを基に作図。
 赤四角の凡例は Umeda et al. (2006)で実施された電磁探査地点。

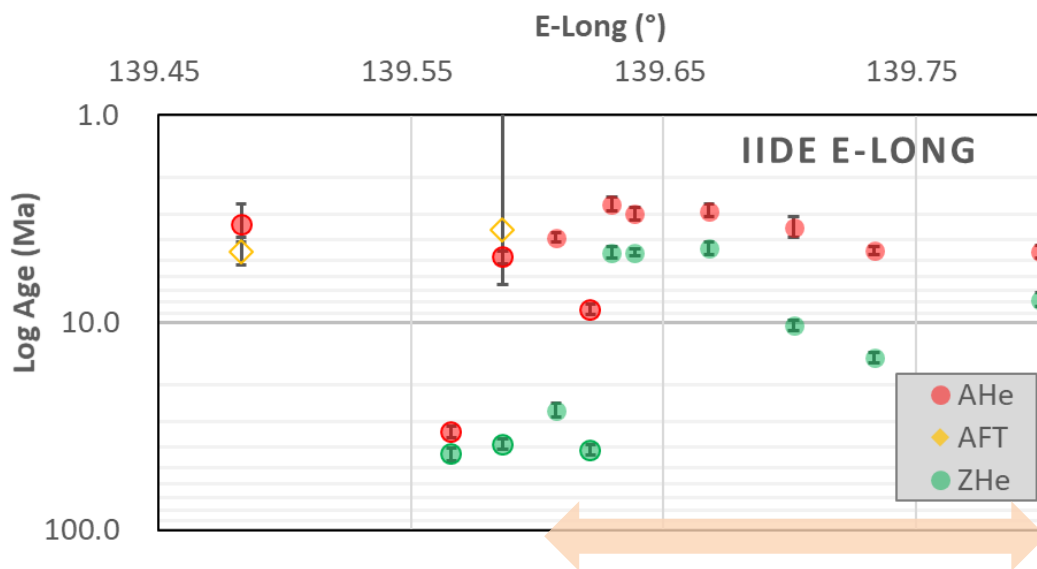


図2 飯豊山地における東西断面の熱年代プロット。すべての誤差範囲は 2σ 。中途りのプロットは図1中の水色の測線付近にある山地中央部のデータを示し、中抜けのプロットは山麓部でのデータを示す。橙色の両矢印は Umeda et al. (2006)において 20 km 以浅に低比抵抗体が分布している範囲。

立山火山噴出物のジルコン U-Pb, U-Th double dating Zircon U-Pb, U-Th double dating on the Tateyama volcanic rocks

伊藤久敏*・丹保俊哉**・飯田 肇**
Hisatoshi Ito*, Toshiya Tanbo** and Hajime Iida**

*: 電力中央研究所, Central Research Institute of Electric Power Industry

** : 立山カルデラ砂防博物館, Tateyama Caldera Sabo Museum

はじめに

北アルプスは、他のアルプス（南・中央）と異なり第四紀火山と第四紀花崗岩が分布している点で特異であり、この成因としてマグマの浮力が深く関わっていると思われる（Ito et al., 2021）。北アルプスの成因をより深く理解することとジルコンの U-Th-Pb 年代測定法（具体的には U-Pb 法と U-Th 法の double dating : Ito, 2024）の（50 万年前よりも）若い試料への適用性向上のため、今回、立山火山噴出物の年代測定を実施した。

立山火山の地質的背景と採取試料

立山火山は K-Ar 法により 22~20 万年前に活動を開始したとされている（中野ほか, 2010）。また、大町テフラのうち DPm（もしくは Tt-D）と EPm（Tt-E）は立山起源とされ、それぞれ噴出年代として約 10 万年前、約 7 万年前が推定されている（川澄, 2022）。立山火山の活動は第 1 期~第 4 期に区分され、第 1 期は 22~20 万年前の 1a 期と 15~10 万年前の 1b 期に細分されている（中野ほか, 2010）。

今回、立山火山噴出物として第 1a 期の湯川谷火山岩類（試料名：YUKA）とそれと同時代とされるスゴ乗越安山岩（SUGO）、第 1b 期の材木坂溶岩の延長部とされる与四兵衛山の安山岩溶岩（YOSHI）、さらに第 2 期の（DPm に対比される）称名滝火砕流堆積物（Kuro）と第 3 期の（EPm に対比される）室堂礫層中のテフラ（Aka）（川澄, 2022）の

合計 5 試料を採取（もしくは収集）した。

年代測定結果

採取した 5 試料全てから粒の大きい（長径>200 μm ）ジルコンが 50 粒子以上得られた（湯川谷火山岩類は 400 g, 他は約 1 kg を鉱物分離した）。Ito (2024)の方法に従い、LA-ICP-MS を用い、U-Pb 年代と U-Th 年代を求めた。今回は、レーザーのスポット径 40 μm , エネルギー密度 7~8 J/cm², 繰り返し周波数 10 Hz で得られた結果のみを報告する。レーザー照射は 30 秒間実施し、U-Pb 年代は 20~30 秒間、U-Th 年代は 10~30 秒間のデータを使用した。年代測定結果を Fig. 1 に示す。

湯川谷火山岩類（YUKA）は U-Pb 年代（加重平均年代）として 390 ± 50 ka（誤差は 95%信頼区間もしくは 2σ で示す。以下同様）、U-Th 年代（アイソクロン年代）として 203 ± 52 ka が得られた。本安山岩は第 1a 期とされるので、噴出年代は 220~200 ka とされており、U-Pb 年代は誤差を超えて古い年代が得られたが、U-Th 年代は誤差の範囲内で噴出年代と一致する結果が得られた。

スゴ乗越安山岩（SUGO）は U-Pb 年代として 482 ± 35 ka, U-Th 年代として 271 ± 80 ka が得られた。本安山岩も第 1a 期とされるので、噴出年代は 220~200 ka とされており、U-Pb 年代は誤差を超えて古い年代が得られたが、U-Th 年代は誤

差の範囲内で噴出年代と一致する結果が得られた。

与四兵衛山の安山岩溶岩 (YOSHI) は U-Pb 年代として 404 ± 54 ka, U-Th 年代として 209 ± 54 ka が得られた。本安山岩は第 1b 期とされるので、噴出年代は 150 ~ 100 ka とされており、両手法とも誤差を超えて古い年代が得られた。

称名滝火砕流堆積物 (Kuro) は U-Pb 年代として 444 ± 90 ka, U-Th 年代としてはアイソクロン年代が計算不能になった。本テフラに対比される DPm の噴出年代は約 100 ka とされるが、U-Pb 年代は誤差を超えてかなり古い年代が得られた。Ito and Danišik (2020) は DPm の U-Pb 年代として 288 ± 28 ka を得ている。今回の U-Pb 年代は、加重平均年代としては Ito and Danišik (2020) よりも誤差を超えて古い年代を示すが、個々の年代は 700 ~ 150 ka の分布を示し、Ito and Danišik (2020) の 630 ~ 140 ka の分布とほぼ同様の結果となった。

室堂礫層中のテフラ (Aka) は U-Pb 年代として 196 ± 66 ka, U-Th 年代として 261 ± 112 ka が得られた。本テフラに対比される EPm の噴出年代は約 70 ka とされるが、両手法とも誤差を超えて古い年代が得られた。

考察

U-Pb 年代は全ての試料で噴出年代よりも誤差を超えて古い加重平均年代を示した。これは Ito and Danišik (2020) で示したように、噴火前に長い (数 10 万年間) マグマ活動があったことを示していると判断される。また、各試料のジルコン粒子の最若年代は、全ての試料について、それぞれの噴出年代と誤差の範囲内で一致 (もしくはほぼ一致) しており (例えば、Aka の最若年代は 87 ± 22

ka), 各試料は噴火の直前までジルコンの晶出があったと判断される。

U-Th 年代は、原理的に約 400 ka よりも古い年代は約 400 ka (Fig. 1 の Equiline が示す年代) と計算されるため、U-Pb 年代 (加重平均年代) が 400 ka かそれよりも古い YUKA, SUGO, YOSHI の U-Pb 年代が U-Th 年代よりも古くなったのは当然である。

今回、U-Th 法により、現段階で有益な情報が得られたとは判断し難い。今後、レーザー径を大きくするなどして U-Th 年代の精度を上げることを目指す予定である。

引用文献

- Ito, H., 2024, Simultaneous U-Pb and U-Th dating using LA-ICP-MS for young (<0.4 Ma) minerals: A reappraisal of the double dating approach. *Minerals*, **14**, 436.
- Ito, H., Adachi, Y., Cambeses, A., Bea, F., Fukuyama, M., Fukuma, K., Yamada, R., Kubo, T., Takehara, M., Horie, K., 2021, The Quaternary Kurobegawa Granite: an example of a deeply dissected resurgent pluton. *Scientific Reports*, **11**, 22059.
- Ito, H. and Danišik, M., 2020, Dating late Quaternary events by the combined U-Pb LA-ICP-MS and (U-Th)/He dating of zircon: A case study on Omachi Tephra suite (central Japan). *Terra Nova*, **32**, 134-140.
- 川澄隆明, 2022, 飛騨山脈の立山西面における砂根山の形成. *地理学評論*, **95A**, 59-74.
- 中野 俊・奥野 充・菊川 茂, 2010, 立山火山. *地質学雑誌*, **116**, 補遺, 37-48.

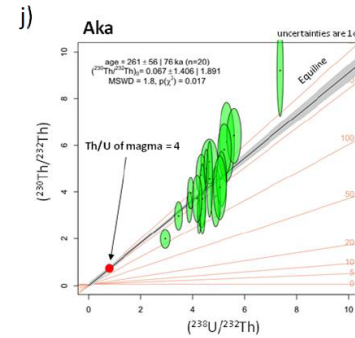
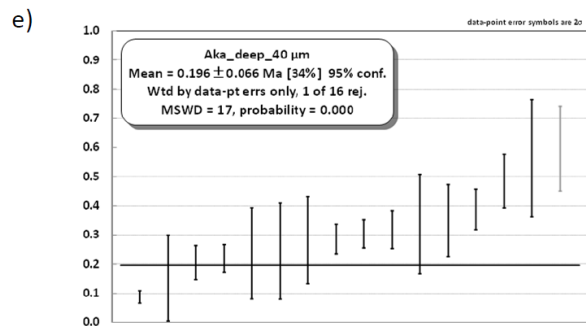
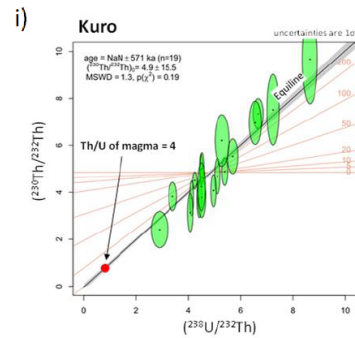
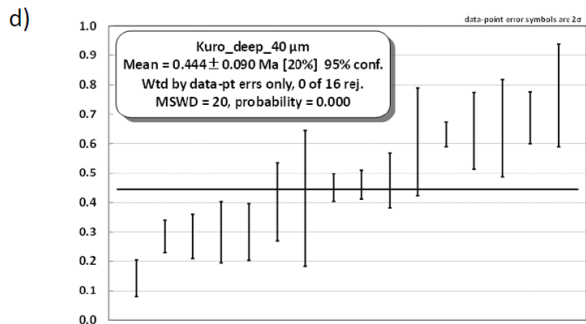
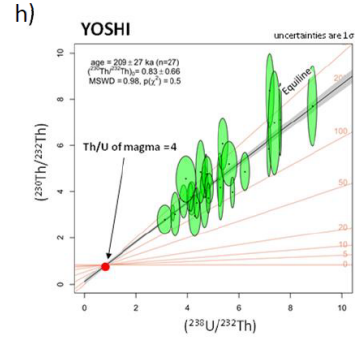
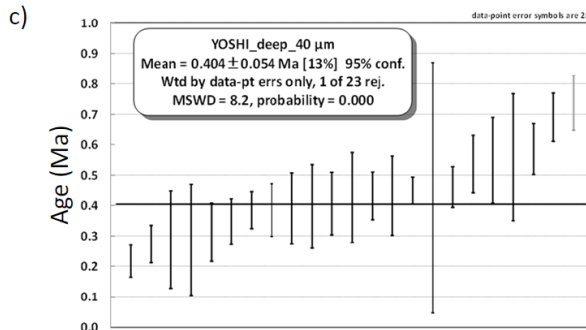
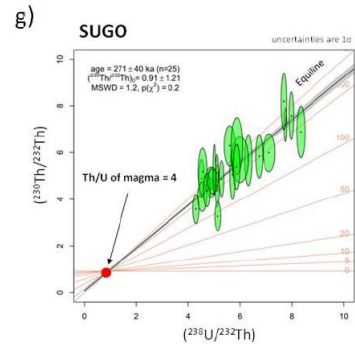
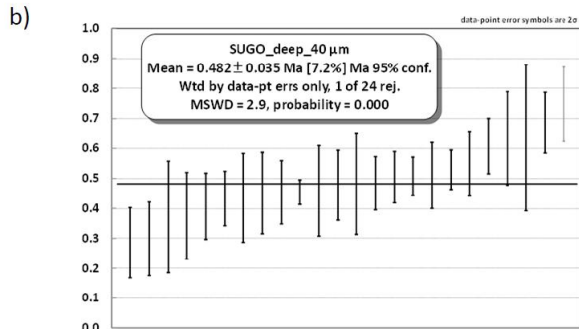
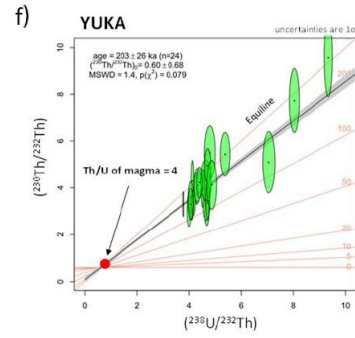
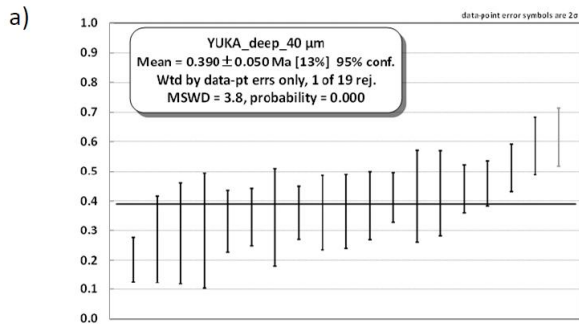


Fig. 1 Zircon U-Pb (a-e) and U-Th isochron (f-j) dating results for Tateyama volcanic rocks. (a-e) ^{238}U - ^{206}Pb age distributions for zircons younger than 1 Ma. Individual grain ages with 2σ uncertainty are arranged in rank order. Analyses in grey represent statistical outliers and were excluded for weighted mean age calculation. Black horizontal lines represent weighted mean age. (f-j) U-Th activity ratio diagram with 1σ uncertainty assuming Th/U of magma at 4.0 ± 0.4 .

1次元熱移流-拡散-生成方程式に基づく数値モデリングと 熱年代学を組み合わせた鮮新世谷川岳花崗岩類の高確度な削剥史 Highly accurate exhumation history combined thermochronology with 1D numerical modelling of heat advection-diffusion- production equation

南 沙樹^{*, **}・末岡 茂^{*}・Luca C. Malatesta^{***}・福田将真^{*}・田上高広^{**}
Saki Minami ^{*, **}, Shigeru Sueoka^{*}, Luca C. Malatesta^{***},
Shima Fukuda ^{*} and Takahiro Tagami^{**}

* : 日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

** : 京都大学, Kyoto University

*** : GFZ 地球科学研究所, GFZ Helmholtz Centre for Geosciences

はじめに

花崗岩類は一般的に数 km 以深で固結するため、固結年代が若い花崗岩の露出地域では、極めて急速な隆起・削剥が期待される。実際、過去 500 万年以内に固結した花崗岩類は、活発な地震活動や火成活動で特徴づけられるプレート収束境界で報告されている (Harayama, 1992)。このような若い花崗岩は、激しい地殻変動に関連して露出したことが期待されるが、その高確度な削剥速度やプロセスに関する知見は十分ではない。

数百万年より長期の岩石の熱/削剥史を推定するには、一般に熱年代学的手法を用いる。この手法は、岩石の経験した冷却史を、適当な地温構造を仮定することで削剥史に読み替える (末岡・田上, 2019)。読み替えの前提条件には、(a) 冷却年代が削剥のみを反映して閉鎖温度を通過したこと、(b) 地温構造が数百万年スケールで一定であること、などが挙げられる。しかし、固結年代の若い花崗岩類の場合、貫入してから地表に露出するまでの時間が短いため、冷却年代は貫入～周囲の温度までの急冷を示す初期冷却および削剥による冷却の両方を反映している可能性がある (Murray et al.,

2019)。よって、単純に冷却速度から計算した削剥速度は、実際の速度よりも過大評価されている可能性がある。本研究では、複数の年代データがある谷川岳地域の鮮新世花崗岩類を事例として、貫入プルトンの冷却史を 1 次元熱数値モデリングによって生成し、複数の熱年代データと比較することで、高確度な削剥速度の推定を試みた。

適用地点

中部日本背弧域に位置する谷川岳地域には、主に後期中新世-鮮新世花崗岩類 (谷川岳花崗岩類; Minami et al., 2021) が露出する。我々の既往研究では、これらの花崗岩類の年代値を以下のように報告してきた：固結年代と解釈されるジルコン U-Pb 年代 (ZU-Pb: ~6.0-3.2 Ma)、冷却年代であるジルコン (U-Th)/He 年代 (ZHe: 3.3-2.6 Ma)、アパタイト (U-Th-Sm)/He 年代 (AHe: 3.3-1.0 Ma) (Minami et al., 2021; 南ほか, 2022)。本研究では、3 種類の年代データがそろっている、固結年代が ~3.3 Ma のプルトン 1 地点 (TNG20-10)、~4.0 Ma のプルトン 2 地点 (TNG21-B03: TNG20-05) にモデリング手法を適用した (Fig. 1)。年代値-閉

鎖温度をプロットから推定される冷却史によれば、TNG20-10およびTNG21-B03は、ZHe法の閉鎖温度に冷却して以降は、比較的一定の速度で冷却を受けている。一方でTNG20-05は、ZHe~AHe年代間に急冷傾向がある (Fig. 1)。

1次元熱モデリング

モデリング手法は、下記手順で実施した。まず、貫入プルトンの削剥史、定置深度、プルトンの厚みを仮定した。次に、1次元熱移流-拡散-生成方程式及び境界条件で記述される地温構造モデルに、これらの3つのパラメーターをインプットすることで、地温構造の経時変化をモデリングした。すなわち、地温構造は岩体の貫入により大きく擾乱され、やがて平衡状態に戻っていく。この変化する地温構造を用いて、上昇する岩石の削剥史を冷却史 (モデル冷却史) へと読み替えた。最後に、アウトプットされたモデル冷却史と既報年代の適合性を評価するために、Misfit値 (μ) を計算した:

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \frac{(t_i^{mod.} - t_i^{obs.})^2}{\Delta t_i^{obs.2}}}$$

$t_i^{mod.}$ はモデル冷却史と閉鎖温度から計算された年代、 $t_i^{obs.} \pm \Delta t_i^{obs.}$ は、既報年代と 2σ の誤差を示す。 $i=1, 2, 3$ はそれぞれ、ジルコン U-Pb, ZHe, AHe 法に対応する。 Misfit 値が小さいほど、年代データに整合的なモデル冷却史であると言える。 よって、 Misfit 値が小さいときのインプットパラメーター (削剥史、定置深度、プルトンの厚み) は、観測データとより整合的な、信頼できる値であることが期待される。 本研究では、貫入以降の削剥速度が一定の場合 (一定削剥史) と、二段階で削剥速度が変化する場合 (2steps 削剥史) の二通りを仮定し、高確度な削剥史を探索した。

結果

TNG20-10では、一定削剥史および、2steps 削剥史をインプットすることで、

3種類すべての既報年代データに 2σ の誤差範囲内で整合的なモデル冷却史が生成できた (Fig. 2a)。 Misfit 値の小さい3つのパラメーターの組み合わせを探索するために作成したヒートマップを、一定削剥史の場合について示す (Figs. 2b-d)。 その結果、削剥史と定置深度のヒートマップにおいて、 Misfit 値が顕著に小さくなる領域が認められた (Fig. 2b)。 このことから、削剥史と定置深度が、岩石の冷却モデルを支配する主要なパラメーターであることが示唆される (Fig. 2b)。 一方でプルトンの厚みは、様々な値をとりうる (Figs. 2c-d)。 Misfit 値が小さくなる上位 3% 中のパラメーターに含まれる削剥速度及び定置深度の組み合わせは、1.3-1.5 mm/yr, 4.0-5.0 km であった (Figs. 2b, 3a)。 2steps 削剥史の上位 3% は、(1) 削剥速度が 0.7-1.9 mm/yr で変化しなかった場合、または(2) 貫入後 0.1-1 Myr 間の急速な削剥の後 1.0-1.6 mm/yr 程度の削剥を受けた場合であり、定置深度は 4.0-7.0 km 深度であった (Fig. 3a)。 一定削剥史と 2steps 削剥史のいずれの場合でも、少なくとも、3 Ma 以降は概ね一定の 1.0-1.6 mm/yr 程度で削剥されていることが明らかとなった (Fig. 3a)。

TNG21-B03では、TNG20-10と同様に、一定削剥史と 2steps 削剥史の両方において、 2σ の誤差範囲で既報年代に重なるモデル冷却史が得られた。 その結果、少なくとも 2.2 Ma 以降は、0.7-1.1 mm/yr の一定速度で削剥されていることが明らかになった。

一方で、TNG20-05では、2steps 削剥史をインプットしたときのみ、 2σ の誤差範囲で重なるモデル冷却史がアウトプットされた。 Misfit 値の小さい上位 3% の削剥史を見ると、2-7 mm/yr の急速な削剥が貫入後 1-2 Myr 間続いたのち、0.2-0.4 mm/yr の速度で現在まで削剥された可能性が示唆された (Fig. 3b)。

2つの手法で推定された削剥速度の比較

TNG20-10について熱年代学的手法 (AHe 年代, ZHe 年代および現在の地温

勾配一定の仮定) および数値モデリングで推定された削剥速度を比較した。AHe年代を用いて推定された削剥速度 (1.2–1.6 mm/yr ; 南ほか, 2022) は, モデリングで推定された削剥速度 (1.0–1.6 mm/yr) と同程度である (Fig. 3a) . よって少なくとも 3.3 Ma の固結年代を持ち, 単調冷却されているサンプルでは, AHe年代は初期冷却を反映していないことが示唆される. 一方で, ZHe年代の閉鎖深度は, モデリングで推定された削剥史よりも深い傾向を示す (Fig. 3a) . このことから, ZHe年代は初期冷却と削剥による冷却の双方の影響を受けている可能性が高い (Fig. 3a) . ゆえに, 本研究地域の場合, ZHe年代は削剥速度の推定には用いない方が妥当であると考えられる.

結論

本研究では, 谷川岳地域に露出する年代既知の鮮新世花崗岩類 3 地点を対象に, 1次元熱モデリングを実施することで, より信頼性の高い削剥速度の推定を試みた. その結果, 3.3 Ma プルトンと 4.0 Ma プルトンの 2 地点では, 少なくとも 2.2 Ma 以降に 0.7–1.6 mm/yr の速度で削剥されていることが明らかになった. また, 少なくとも 3.3 Ma より固結年代が古く, 単調冷却しているような貫入プルトンの AHe年代は, 削剥速度のみを反映した冷却年代であることが示唆された. 年代データと熱モデリングを組み合わせた手法は, 若い花崗岩類のような, 熱史と削剥史の対応付けが容易ではない場合において, 冷却年代の解釈の高度化に有用だと考えられる. 今後の展望としては, 花崗岩類の定置深度データを取得することで, より高確度な削剥速度推定に繋がることが期待される.

謝辞

本研究は, JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2110 の支援を受け実施した. また, GFZ German Research Centre for Geosciences Potsdam においてリサーチアシスタントとして雇用いただき, 金銭的支援および研究遂行の機会を得た. ここに深く感謝申し上げます.

引用文献

- Harayama, S., 1992, Youngest exposed granitoid pluton on Earth: Cooling and rapid uplift of the Pliocene-Quaternary Takidani Granodiorite in the Japan Alps, central Japan. *Geology*, **20**, 657-660.
- Minami, S., Nagata, M., Sueoka, S., Fukuda, S., Kajita, Y., Ogita, Y., Kagami, S., Yokoyama, T., Tagami, T., 2021, Two pulse intrusive events of the Pliocene Tanigawa-dake granites revealed from zircon U–Pb dating. *Earth, Planets, and Spaces*, **73**, 231.
- 南 沙樹・末岡 茂・福田将眞・長田充弘・Barry P. Kohn・横山立憲・鏡味沙耶・梶田侑弥・田上高広, 2022, 熱年代学的手法に基づく谷川岳地域の熱史・削剥史の推定. *フィッション・トラックニュースレター*, **35**, 22-26.
- Murray, K. E., Braun, J., Reiners, P. W., 2018, Toward robust interpretation of low-temperature thermochronometers in magmatic terranes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **19**, 3739-3763.
- 末岡 茂・田上高広, 2019, 低温領域の熱年代学の原理と地殻浅部のテクトニクスへの応用. *地学雑誌*, **128**, 707-730.

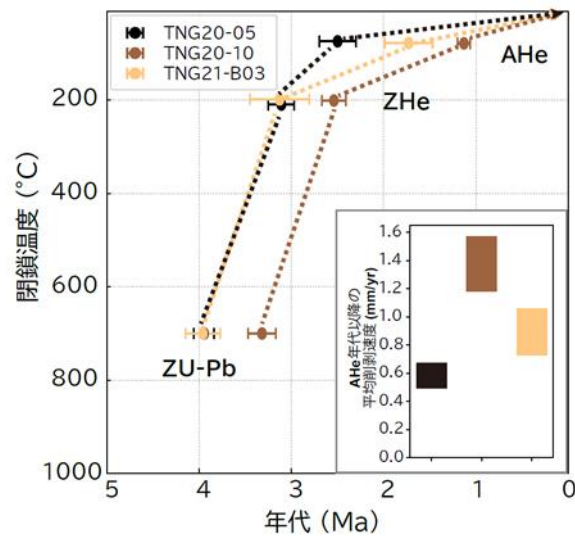


Fig. 1 冷却史および熱年代学的手法に基づく削剥速度。
年代データおよび平均削剥速度は Minami et al. (2021), 南ほか (2022) より引用。

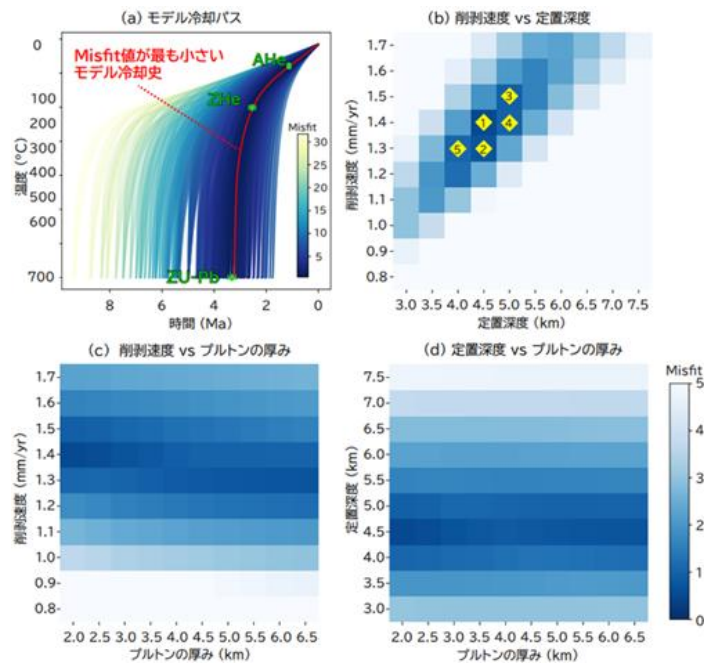


Fig. 2 一定削剥速度をインプットした場合のモデリング結果。
(a) モデル冷却パス. 緑○で示される年代は, Minami et al. (2021), 南ほか (2022) より引用. (b-d)各インプットパラメーターの組み合わせについてのヒートマップ. 1つのセルに対して複数ある Misfit 値のうち, 最小の値となる組み合わせを最前面に表示.
(b) 図中のダイヤと番号は, Misfit 値が小さい上位 3%のパラメーター中に含まれる削剥速度-定置深度の組み合わせを Misfit 値の小さい順に番号を付けた.

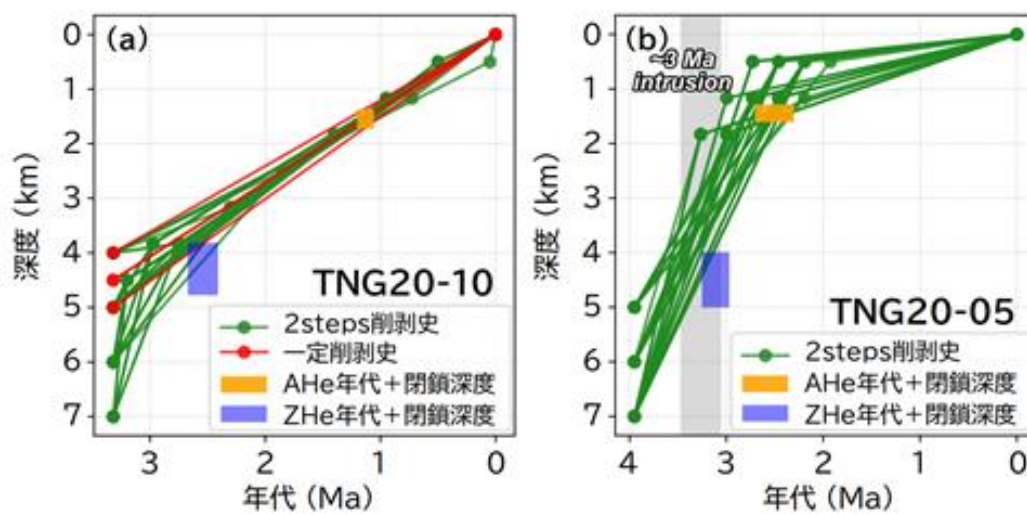


Fig. 3 2つの手法で推定された削剥速度の比較

“神通層群”は必要なのか？ Is the name "Jinzu Group" necessary?

長田充弘*・林 芳美**・大藤 茂**
Mitsuhiro Nagata*, Yoshimi Hayashi** and Shigeru Otoh**

*：日本大学, Nihon University

**：富山大学, University of Toyama

はじめに

福井県、石川県、岐阜県、富山県、新潟県、および長野県には、ジュラ紀～白亜紀の動植物化石を産することで有名な“手取層群”が分布する（例えば、前田, 1961 ; Fig. 1）。“手取層群”は伝統的に下位より海成層の九頭竜（九頭龍）亜層群、海成～汽水成の石徹白亜層群、および陸成の赤岩亜層群に区分されてきた（例えば、前田, 1961）。また、福井県、石川県、岐阜県南部の手取層群の分布域は白山区と、富山県・新潟県・岐阜県北部の手取層群の分布域は神通区とそれぞれ呼ばれてきた（例えば、前田, 1961 ; Fig. 1）。近年、層序学・古生物学・年代学的研究が進み、旧来の九頭竜亜層群を九頭竜層群とし、旧来の石徹白・赤岩亜層群を手取層群とする提唱がなされ、福井県の九頭竜川上流および石徹白川沿いがそれぞれの層群の模式地に指定された（Yamada and Sano, 2018）。神通区の手取層群については、白山区の手取層群（旧来の石徹白・赤岩亜層群）に古くから対比されてきたが（例えば、前田, 1956）、近年、凝灰質岩から得られたジルコンフィッショントラック（以下、ZFT）年代値が121–103 Maと若く、白山区の手取層群に対比されるものがないことを根拠に“神通層群”の提唱がなされた（松川ほか, 2014）。

著者らは、神通区の“手取層群”の調査・研究を上記の提唱の前から行っているが、“神通層群”については、いくつかの疑問を抱いている。“神通層

群”における個々の疑問点（問題点）については、長田ほか（2025）で述べたが、以下にその要点を述べる。①松川ほか（2014）が報告した121–103 MaのZFT年代値を得た“凝灰質岩”の周囲には貫入岩が見られ、この貫入岩からはZFT年代値と調和的な108.9 Maと106.9 MaのジルコンU–Pb年代値が得られている（Nagata et al., 2018）。②松川ほか（2014）が採取した“凝灰質岩”を層位準に並べると、必ずしも上位ほど若くならない（Nagata et al., 2018）。③Nagata et al. (2018)は富山県富山市大清水に分布する神通区の手取層群の凝灰岩から約120 MaのジルコンU–Pb年代値を報告し、約120 Maの年代値が報告されている白山区の手取層群赤岩層の凝灰岩（酒井ほか, 2015）に対比した。①～③を踏まえて、松川ほか（2014）が得たZFT年代値を貫入岩による若返り年代であり、白山区と神通区の手取層群は対比されるものと考えた（Nagata et al., 2018）。従って、“神通層群”が白山区の手取層群に比べて若いとする松川ほか（2014）の解釈は否定されたことになる。松川（2021）もNagata et al. (2018)の神通区の手取層群の年代論をおおむね認め、岩相や年代論などを考慮し、“神通層群”を白山区の手取層群である大倉層や後野層と対比している。従って、小論では、長田ほか（2025）と同様に“神通層群”を用いず、手取層群と呼ぶ。

小論では、上述した問題の追加データとして、岐阜県恐竜化石学術調査団

(1997) および松川ほか (2014) が ZFT 年代値を報告した“凝灰質岩”について一定の知見が得られたので、下記に報告する。尚、小論では、date に対応する訳語を“年代値”とし、age に対応するものを“年代”とした。

地質概説

岐阜県山之村地域には、手取層群が広く分布し、その南側ないし西側から飛驒花崗岩類が衝上する (Fig. 2)。飛驒花崗岩類は、主にほぼ非変形の花崗岩、花崗閃緑岩、閃緑岩からなる。当地域に近い飛驒帯花崗岩類からは、約 194 Ma のジルコン U-Pb 年代値が報告されているため (Yamada et al., 2021)、ジュラ紀の飛驒新期花崗岩 (Takahashi et al., 2010) であると推定される。

当地域を含む富山県—岐阜県境付近の手取層群は、下位より庵谷峠層および猪谷層からなる (例えば、松川ほか, 2014)。

庵谷峠層は主に礫岩からなり、手取層群の基底礫岩層であり、礫種は主に深成岩からなる。

猪谷層は主に砂岩と泥岩の互層からなり、一部に礫岩や凝灰岩を含む。猪谷層は上部と下部に分けられ、その境界付近には南俣谷礫岩部層がみられる。調査地域から約 12 km 北西の岐阜県神岡地域の猪谷層下部 (旧来の猪谷砂岩泥岩互層) 中の凝灰岩からは 127.4 ± 0.8 Ma および 127.2 ± 0.7 Ma のジルコン U-Pb 年代値が (高津ほか, 2025)、調査地域から約 18 km 北西の富山県大清水地域の凝灰岩と熊野川地域の猪谷層上部の凝灰質岩 (旧来の和佐府砂岩泥岩互層) からは、それぞれ 120.9 ± 1.1 Ma および 121.33 ± 0.80 Ma のジルコン U-Pb 年代値が報告されている (Nagata et al., 2018; 長田ほか,

2025)。上述した凝灰質岩類からは火山ガラスの痕跡が確認されており、それらのジルコンの多くは前期白亜紀を示す (Nagata et al., 2018; 長田ほか, 2025)。尚、Nagata et al. (2018) の約 120 Ma の年代値を報告した凝灰岩の層準を猪谷層の上位に位置する白岩川層とする文献もあるが (Isozaki et al., 2023)、これは完全な誤りである。当地域の手取層群を切る貫入岩から 108.9 Ma と 106.9 Ma のジルコン U-Pb 年代値が報告されている (Nagata et al., 2018 の試料 YM1 および YM2; Fig. 2)。

採取試料・ジルコン U-Pb 年代測定手法

先行研究の岐阜県恐竜化石学術調査団 (1997) および松川ほか (2014) が ZFT 年代値を報告した猪谷層“凝灰質岩”とされる 2 試料から年代測定を行った。これらの試料は緑泥石、セリサイトなどの粘土鉱物が多く含み、変質している。石英、斜長石などの鉱物片や花崗岩などの岩片は認められるが、凝灰質岩の根拠となりうる火山ガラスは、痕跡なども含めて確認できない。

ジルコン U-Pb 年代測定には、名古屋大学大学院環境学研究科設置の LA-ICPMS を用いた。分析条件の詳細は、高地ほか (2015) を参照されたい。

測定結果・考察

いずれの試料も得られたジルコンは古原生代、ペルム紀—三疊紀、およびジュラ紀であり、最も若い年代値 (YSG) は約 160 Ma であった。

これらの年代分布は磯崎ほか (2024) が報告した各地の手取層群の砂岩の年代分布に類似する。これらの試料には、上述した通り火山ガラスの痕跡が確認できない。さらに、これらの試料が凝灰質岩であるならば、ZFT 年代測定によって報

告された前期白亜紀 Aptian~Albian の年代値がジルコン U-Pb 年代測定でも得られる蓋然性が高いはずだが、小論の試料から前期白亜紀ジルコンは 1 データも得られていない。以上を踏まえると、これらの試料を“凝灰質岩”とする積極的な根拠はない。近傍に貫入岩がみられることから考えても、熟もしくは続成により変質した砂岩や泥岩と解釈される。

これらを踏まえ、神通区の手取層群から得られたジルコン ZFT 年代値は堆積後の熱変質の年代であり、神通区の手取層群は概ね白山区の手取層群に対比できるものと考えた。従って、著者らは、“神通層群”の定義は不要と判断した。

また、手取層群に限った話ではないが、以下に小論を踏まえて教訓を述べておきたい。1) フィールドネームのみでの岩石記載は避け、薄片などを作成して岩石を記載すべきである。2) 産状や地質学的背景を鑑み、得られた年代値がどのような年代を示すのか慎重に判断しなければならない。3) 先行研究は熟読し、適切に参照すべきである。

終わりに

近年、地層名と地名が違うことを根拠に、地名に基づいた地層名に改める例が見られる（例えば、佐藤・滝澤, 2024 の Tedor Group）。これは手取層群の由来である手取川の読みが「Tedor-gawa」であることを根拠としているが、手取層群の前身である手取統が名づけられて以来、地質単元名には「Tetori」が用いられてきた（例えば、Yokoyama, 1895）。同様な事例は、跡倉層、御荷鉾緑色岩類、棚倉構造線、初声層など多々ある。しかしながら、国際層序ガイドの 3B. 3a. ii の地理的名称の表記の項目には、次のように例を挙げてこのような行為を推奨していな

い。「例えば、Bennett Shale は多年にわたって使用されてきたが、語源となった町名が Bennet であることを根拠として Bennet Shale と改称すべきではない」（日本地質学会訳編, 2001）。以上に示したように、このような行為は、手取層群に限らず、あらゆる地質名称に混乱をもたらすため、肯定するべきではない。

謝辞

株式会社京都フィッション・トラックの檀原 徹氏と岩野英樹氏および島根大学総合理工学部の大平寛人准教授には、先行研究の FT 年代値の詳細について、様々な情報をご提供いただいた。岐阜県博物館の高津翔平氏には、高津ほか (2025) の詳細について情報をご提供いただいた。尚、本内容の詳細は、別稿にて述べたい。

引用文献

- 岐阜県恐竜化石学術調査団, 1997, 岐阜県 神岡町山之村地域における手取層群の地質. *岐阜県博物館調査研究報告*, **18**, 1-9.
- 磯崎行雄・岩野英樹・澤木佑介・柗座圭太郎・平田岳史, 2024, 後期三疊紀花崗岩類を含む白亜紀後背地からみた飛騨帯の起源—手取砂岩中のジルコン U-Pb 年代と微量元素組成—. *地学雑誌*, **133**, 195218.
- Isozaki, Y., Sawaki, Y., Iwano, H., Hirata, T., Kunugiza, K., 2023, Late Triassic A - type granite boulders in Lower Cretaceous conglomerate of the Hida belt, Japan: Their origin and bearing on the Yamato tectonic line in Far East Asia. *Island Arc*, **32**, e12475.
- 高地吉一・折橋裕二・小原北士・藤本辰弥, 春田泰宏・山本鋼志, 2015, 213 nm Nd: YAG レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析計を用いたジルコンの

- U-Pb年代測定：Pb/U分別補正にNIST SRM 610を用いるための分析条件最適化. *地球化学*, **49**, 19–35.
- 高津翔平・今井拓哉・河部壮一郎・服部創紀・菌田哲平・湯川弘一, 2025, 岐阜県飛騨市神岡地域から下部白亜系初となる脊椎動物骨化石の発見と堆積年代の推察. *日本古生物学会第174回例会講演予稿集*, 30.
- 前田四郎, 1956, 富山県常願寺川流域の手取層群の層序と構造. *千葉大学文理学部紀要(自然科学)*, **2**, 44–49.
- 前田四郎, 1961, 手取層群の地史学的研究. *千葉大学文理学部紀要*, **3**, 369–426.
- 松川正樹, 2021, 手取層群の主要分布地域の堆積環境の復元と堆積盆地の発達. *地学雑誌*, **130**, 653–681.
- 松川正樹・福井真木子・小河佑太力・田子豪・小荒井千人・大平寛人・林慶一, 2014, 手取層群の分布域東部(富山・岐阜県境)の層序の再検討と神通層群(新称)の提案. *地質学雑誌*, **120**, 147–164.
- Nagata, M., Hayashi, Y., Sakashita, T., Kawagoe, Y., Kouchi, Y., Hirasawa, S., Fujita, M., Yamamoto, K., Otoh, S., 2018, When did the deposition of the Tetori group terminate? *Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum*, **17**, 9–26.
- 長田充弘・藤田将人・吉岡翼・大藤茂, 2025, 富山県熊野川流域の手取層群の堆積年代. *富山市科学博物館研究報告*, **49**, 1–6.
- 日本地質学会訳編, 2001, 国際層序ガイド一層序区分・用語法・手順へのガイド. 共立出版, 238p.
- 酒井佑輔・菌田哲平・堤之恭・楠橋直・堀江憲路・松岡篤, 2015, 石川県白峰地域における手取層群赤岩亜層群の凝灰岩から得られたジルコンのU-Pb年代. *日本古生物学会2015年年会・総会講演予稿集*, **49**.
- 佐藤興平・滝澤文教, 2024, 飛騨神岡周辺に産する白亜紀中期の流紋岩類：K-Ar年代と主成分組成. *群馬県立自然史博物館研究報告*, **28**, 161–168.
- Takahashi, Y., Cho, D. L., Kee, W. S., 2010, Timing of mylonitization in the Funatsu Shear Zone within Hida Belt of southwest Japan: Implications for correlation with the shear zones around the Ogcheon Belt in the Korean Peninsula. *Gondwana Research*, **17**, 102–115.
- Yamada, T. and Sano, S., 2018, Designation of the type section of the Tetori Group and redefinition of the Kuzuryu Group, distributed in Central Japan. *Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum*, **17**, 89–94.
- Yamada, R., Sawada, H., Aoyama, S., Ouchi, W., Niki, S., Nagata, M., Takahashi, T., Hirata, T., 2021, Zircon U–Pb ages and whole-rock geochemistry from the Hida granites: implications for the geotectonic history and the origin of Mesozoic granites in the Hida belt, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, **116**, 61–66.
- Yokoyama, M., 1895, Mesozoic plants from Kozuke, Kii, Awa, and Tosa. *Journal of the College of Science, Imperial University, Japan*, **7**, 201–231.

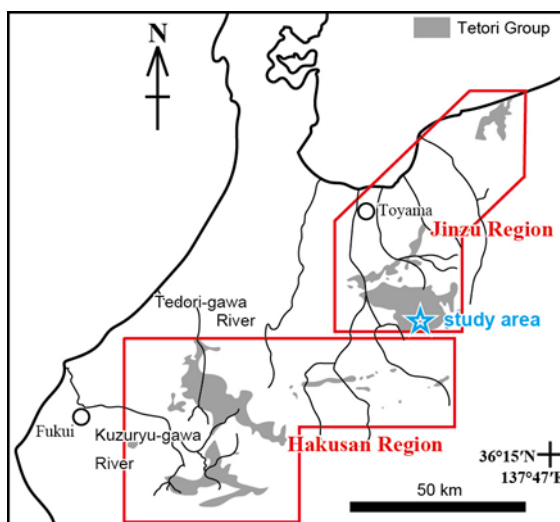


図1 手取層群の分布図. 前田 (1961) を改変.

Fig. 1 Index map showing the distribution of the Tetori Group. Modified from Maeda (1961).

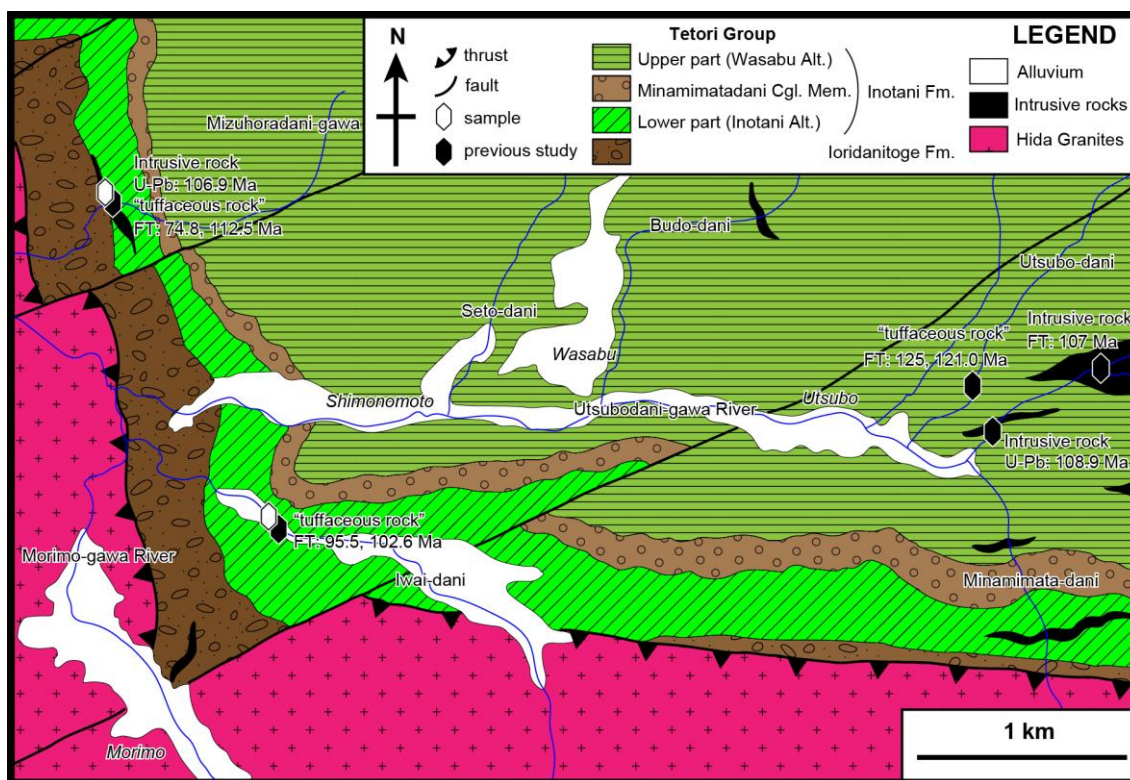


図2 山之村地域の地質図. 岐阜県恐竜化石学術調査団 (1997) を改変.

各年代値は岐阜県恐竜化石学術調査団 (1997), 松川ほか (2014), Nagata et al. (2018).

Fig. 2 Geological map of the Yamanomura area.

Modified from Gifu-ken Dinosaur Fossil Excavation Party (1997). Abbreviations alt.: alternation, Cgl.: Conglomerate, Fm.: Formation, Mem.: Member.

(U-Th)/He 熱年代に基づいた佐渡島の花崗岩類の冷却・削剥史 Cooling/exhumation history of granitic rocks in the Sado Island, central Japan, based on (U-Th)/He thermochronometry

末岡 茂*・福田将眞*・Kohn, B.P.**・田上高広***
Shigeru Sueoka*, Shoma Fukuda*, Barry P. Kohn** and Takahiro Tagami***

* : 日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

** : メルボルン大学地理・地球・大気科学研究科, School of Geography, Earth and Atmospheric Sciences, University of Melbourne

*** : 京都大学地球惑星科学専攻, Division of Earth & Planetary Sciences, Kyoto University

はじめに

日本海東縁には多数の海底活断層が発達しM7級の巨大地震が繰り返し発生しており, 日本海東縁変動帯(または日本海東縁ひずみ集中帯)と呼ばれている. この地域の地震活動が活発な理由として, 第四紀の中頃に北海道中部から日本海東縁に北米-ユーラシアプレート境界が移動したという説が提唱されている(中村, 1983). しかし, 本説の是非については様々な議論があり(衣笠, 1990; Kato et al., 2004), 境界が移動したと考える研究者の間でも, プレート境界の通過位置や移動時期などについて複数の見解が示されている(Seno, 1985; Sagiya et al., 2000; Heki and Miyazaki, 2001; 深畑ほか, 2022). このように意見が分かれる理由の一つとして, 本地域が海域であり調査手法が限定されることが考えられる.

佐渡島は東北日本背弧側に位置する離島で, 日本海東縁変動帯の数少ない陸上露出部である. 佐渡島は, 東北日本弧の多くの山地・盆地と同様, 日本海拡大時に形成された正断層が, 鮮新世~第四紀の圧縮応力場で逆断層として再活動したインバージョンテクトニクス(Okamura et al., 1995)によって大局的には形成されたと考えられている(佐渡ジオパーク

推進協議会, 2022). したがって, 日本海東縁変動帯のプレート境界問題を含めた, 東北日本弧のネオテクトニクスの研究には好適な地域である.

佐渡島の沿岸部には, 多段の更新世海成段丘が発達している(太田, 1964; 太田ほか, 1992). これらの離水年代と分布高度に基づくと, 大佐渡と小佐渡は約30~40万年前以降, 南東方向に傾動しながら隆起してきたと推測される(太田ほか, 1992). 一方, 山地の分水嶺は南東側に偏って分布しており, 100万年スケールでは逆に北西方向に傾動していた可能性が示唆されている(太田ほか, 1992). 本研究では, 佐渡島の100万年スケールでの隆起・削剥史の解明, 特に北西傾動の有無と, 北西から南東に傾動方向が変化した原因を検討するために, 佐渡島の花崗岩類を対象に, (U-Th)/He熱年代法を適用して冷却・削剥史を復元した.

試料採取

本研究では計4地点で岩石試料を採取した(図1). 大佐渡の1地点(北鶴島)と小佐渡の2地点(川茂, 岩首)では後期白亜紀の花崗岩類を採取した. 北鶴島の花崗閃緑岩体では, 約109~105 Maのジルコン U-Pb年代(早坂ほか,

2014; Yokoyama et al., 2016), 約 99 Ma の黒雲母 K-Ar 年代 (通産省, 1987), 約 74 Ma のジルコンフィッション・トラック年代 (雁沢, 1982) が報告されている. 川茂と岩首の花崗岩体では, それぞれ約 96 Ma と約 95 Ma の黒雲母 K-Ar 年代が得られている (通産省, 1987). また, 大佐渡の 1 地点 (片辺) では前期中新世の凝灰角礫岩 (片辺礫岩) に含まれる花崗岩礫を採取した. 片辺礫岩の花崗岩礫は, 約 106~101 Ma のジルコンおよびモナザイトの U-Pb 年代を示し (早坂ほか, 2014; Yokoyama et al., 2016), 阿武隈帯の花崗岩に対比されると解釈されている (早坂ほか, 2014). 採取した岩石試料は, 京都フィッション・トラック株式会社に依頼し, ふるい掛け・重液分離等の一般的な手順を用いて, 分析対象鉱物 (アパタイト, ジルコン) を分離した.

(U-Th)/He 分析とその結果・解釈

(U-Th)/He 年代の測定は, メルボルン大学で実施した. 分析の手順・条件の詳細は, Nakajima et al. (2023)などを参照のこと. 北鷓島, 川茂, 岩首のジルコン (U-Th)/He 年代は, 白亜紀~古第三紀初頭の古い年代を示しており (図 1), 深成岩体の初期冷却ないし日本海拡大以前の大陸縁時代における削剝を主に反映していると考えられる. 一方, アパタイト (U-Th)/He 年代は中新世~鮮新世の比較的若い年代を示し (図 1), 日本海拡大以降のイベントを反映していると解釈される. 片辺礫岩の花崗岩礫では, ジルコンとアパタイトの (U-Th)/He 年代がいずれも中新世を示し誤差範囲で重なることから, 日本海拡大時に再加熱を経験した可能性がある.

熱史逆解析とその結果・解釈

得られた単粒子年代を基に熱史逆解析ソフトの QTQt (Gallagher, 2012) を用いて熱史をより詳細に検討した. QTQt では四種類の統計量に基づいた冷却パスが計算されるが (図 1), 本研究では QTQt

のマニュアルで推奨されている期待値最大モデルを基に熱史を解釈した.

小佐渡の 2 地点 (川茂, 岩首) では約 10 Ma 以前に漸進的な加熱を被った後, 数 Ma 以降に急冷されるという温度変化が共通して得られた. これらはそれぞれ, 中新世のリフティングに伴う沈降・堆積と, 鮮新世以降の東西圧縮による隆起・削剝を反映していると考えられる. 数 Ma 以降の冷却は, 南東側の岩首でより顕著に観られたが, これは 100 万年スケールでは小佐渡が北西傾動していたというモデルと整合的である.

一方, 大佐渡の 2 地点 (北鷓島, 片辺) では, 最近数 Ma の急冷は不明瞭であった. この原因として, 試料を採取した 2 地点がいずれも北西側の沿岸部であったため, 北西傾動に伴う隆起・削剝量が少ないことに加えて, 最近の南東傾動をもたらしている逆断層 (外海府断層系) から見ても下盤側に当たるため, 総じて鮮新世以降の隆起・削剝が顕著ではなかったことが考えられる.

おわりに

大佐渡における北西傾動の有無の確認と, 小佐渡における北西傾動のより確実な証拠の提示のためには, 測定地点数を増やすことが望まれる. しかし, グリーン・タフに覆われた佐渡島では, 少なくとも地質図スケールでは, 花崗岩類の露出地域は極めて限られている (図 1). 佐渡島の花崗岩露頭の情報 (特に大佐渡) をお持ちの方がいれば, 著者らに情報提供いただければ幸甚である.

引用文献

- 深畑幸俊・岡崎智久・西村卓也, 2022, GNSS データに基づく日本列島の歪み速度場と島弧間および島弧内変動. *地学雑誌*, **131**, 479-496.

- Gallagher, K., 2012, Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology. *Journal of Geophysical Research*, **117**, B02408.
- 雁沢好博, 1982, フィッション・トラック法によるグリーン・タフ変動の年代区分: その1 佐渡地域. *地質学雑誌*, **88**, 943-956.
- 早坂康隆・木村光佑・勝部亜矢, 2014, 佐渡島基盤岩類のジルコン年代学からみた地体構造対比. *日本地質学会第121年学術大会講演要旨*, 448.
- Heki, K. and Miyazaki, S., 2001, Plate convergence and long-term crustal deformation in central Japan. *Geophysical Research Letters*, **28**, 2313-2316.
- Kato, N. Sato, H., Orito, M., Hirakawa, K., Ikeda, Y., Ito, T., 2004, Has the plate boundary shifted from central Hokkaido to the eastern part of the Sea of Japan? *Tectonophysics*, **388**, 75-84.
- 衣笠善博, 1990, 東北日本北米プレート説再考: 地形・地質から. *地学雑誌*, **99**, 13-17.
- Nakajima, T., Sueoka, S., Nagata, M., Kohn, B. P., Ramos, N. T., Tsutsumi, H., Tagami, T., 2023, First report of geo- and thermochronological results from the Cordillera Central, Luzon, Philippines. *Earth, Planets and Space*, **75**, 176.
- 中村一明, 1983, 日本海東縁新生海溝の可能性. *地震研究所彙報*, **58**, 711-722.
- Okamura, Y., Watanabe, M., Morijiri, R., Satoh, M., 1995, Rifting and basin inversion in the eastern margin of the Japan Sea. *Island Arc*, **4**, 166-181.
- 太田陽子, 1964, 大佐渡沿岸の海岸段丘. *地理学評論*, **37**, 226-242.
- 太田陽子・宮脇明子・塩見美奈子, 1992, 佐渡島の海成段丘をきる活断層とその意義. *地学雑誌*, **101**, 205-224.
- 佐渡ジオパーク推進協議会・編, 2022, よくわかる佐渡ジオパーク: 自然と人の暮らし, 171p.
- Sagiya, T. Miyazaki, S., Tada, T., 2000, Continuous GPS array and present-day crustal deformation of Japan. *Pure and Applied Geophysics*, **157**, 2302-2322.
- Seno, T., 1985, "Northern Honshu microplate" hypothesis and tectonics in the surrounding regions: When did the plate boundary jump from central Hokkaido to the eastern margin of the Japan Sea? *Journal of the Geodetic Society of Japan*, **31**, 106-123.
- 通商産業省資源エネルギー庁, 1987, 昭和61年度広域地質構造調査報告書, 佐渡地域, 239p.
- Yokoyama, S., Tani, K. Tsutsumi, Y., 2016, Petrological study of Cretaceous granitoids and Triassic sandstones in Sado Island. *Memoirs of the National Science Museum, Tokyo*, **51**, 53-58.

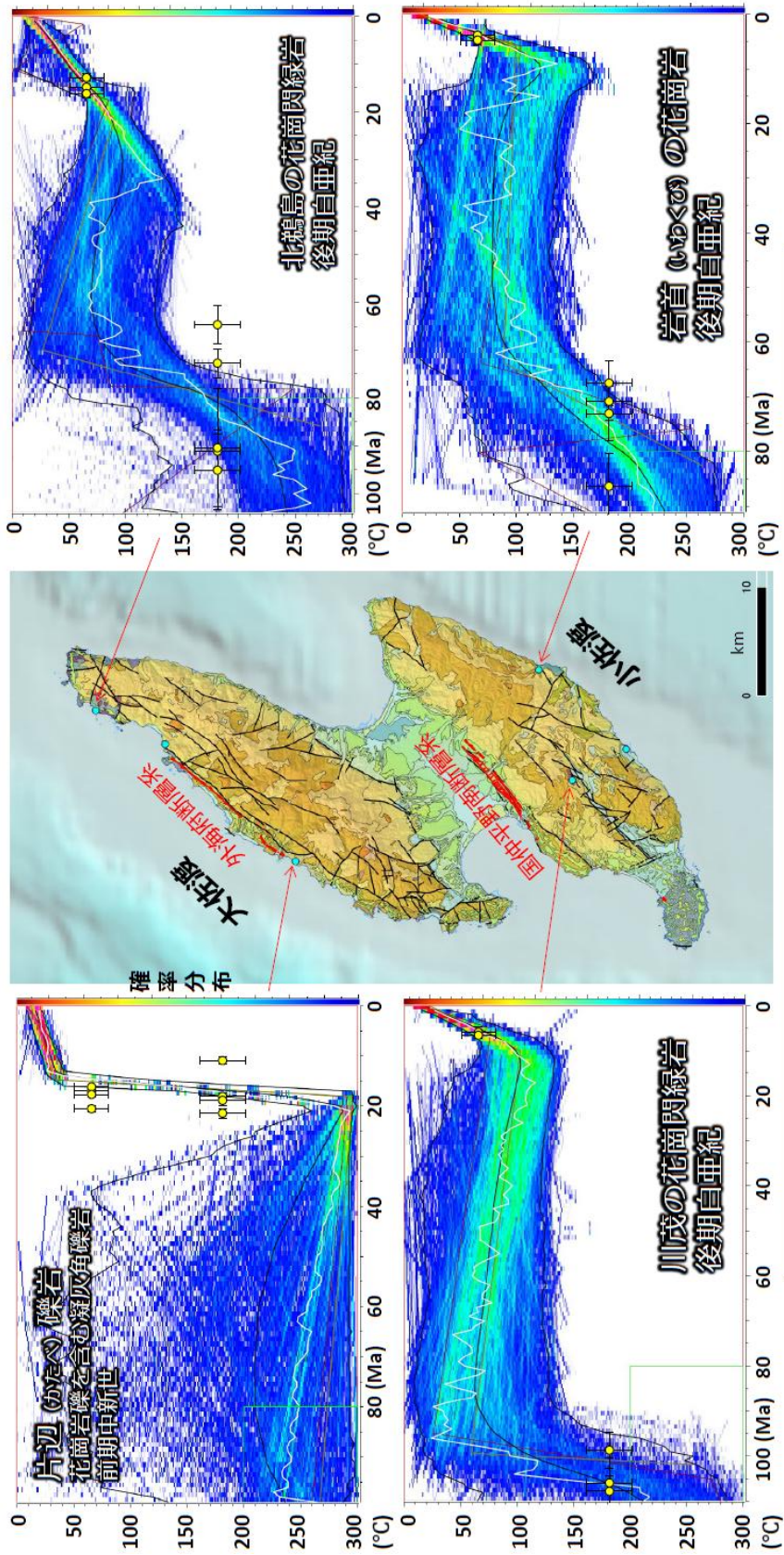


図1 試料採取地点と熱史逆解析結果. 基図には産総研の1/20万日本シームレス地質図を使用. 熱史逆解析結果との比較のため, (U-Th)/He 単粒子年代の値をアパタイトは50~80°C, ジルコンは160~200°Cの位置にプロットした.

Fig. 1 Sampling sites and thermal inversion results. AIST 1:200,000 seamless digital geological map of Japan was used as the base map. Single-grain (U-Th)/He dates for apatite and zircon are plotted at 50-80°C and 160-200°C, respectively, for comparison with the thermal inversion results.

K-Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定のための鉱物分離について Mineral Separation for K-Ar and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating

山崎誠子*・宮川歩夢*・板木拓也*

Seiko Yamasaki *, Ayumu Miyakawa *, Takuya Itaki *

*: 産業技術総合研究所, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

はじめに

K-Ar や $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定のためには、前処理として鉱物分離が欠かせない。火山岩の場合では、“噴火年代”を測定する際には、マグマ溜まりで固結し過剰 ^{40}Ar を含む可能性のある斑晶鉱物を取り除き、噴火後に固結した石基のみを分離して測定することが一般的である。本稿では産総研で実施している火山岩の鉱物分離（石基フラクション分離）について、一連の鉱物分離の手順と、最近取り組んでいる AI を用いたハンドピックの効率化の試みについて紹介する。

鉱物分離と前処理手順

火山岩試料はまず岩石カッターで切断後、岩石破断機で 1 cm 程度のサイズに砕き、変質部や包有物を取り除く。鉄鉢での粉碎とふるいがけを繰り返して、180-250 μm のサイズに揃え、純水で洗浄し、オーブンで乾燥後、磁性分離および SPT を用いた重液分離（檀原, 1992, 藤原ほか, 2021）により石基フラクションを分離回収する。それでも残った斑晶鉱物は、顕微鏡下でハンドピックにより取り除く。分離した石基試料は 1N 塩酸, 1N 硝酸, 純水で 1 時間ずつ超音波洗浄し、乾燥後に分析に用いる。

AI を用いた手順の効率化の試み

数万年前程度の若い火山岩試料については、K-Ar 年代測定のカリウム分析には 0.05~0.1 g, アルゴン同位体分析には 0.5~1.5 g, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代測定には 0.03~

0.06 g 程度の石基フラクションが必要となる。複数回の測定をしようとする数 g の石基フラクションを回収しておくのが好ましいが、試料によっては磁性分離や重液分離で十分に分離できない場合もあり、ハンドピックに時間がかかることも多い。そこで、効率的に鉱物分離を行うために、AI の画像認識による石基・斑晶の判別と自動ハンドピックができないか取り組みを進めている（図 1）。システムは微化石の単一分離・集積のために開発された深層学習マイクロコンピュータシステム（Itaki et al., 2020）を用いた。類似のシステムは Isozaki et al. (2018) で年代測定用ジルコンの分離にも利用されている。本研究では、(1) 判別しやすい画像の取得のための条件、(2) 形状ではなく色を重視した教師データの作成について検討を行なった。現状では斜長石斑晶が混入している石基試料について、画像認識と深層学習による石基・斑晶の判別は高い精度で成功できているが、マイクロコンピュータによるピッキングおよびステージ上の試料の交換の作業効率に改良の余地が残っている。今後より効率的なピッキング作業のために検討を進める。

引用文献

檀原 徹・岩野英樹・糟谷正雄・山下 透・角井朝昭, 1992, 無毒な重液 SPT (ポリタングステン酸ナトリウム) とその利用. *地質ニュース*, **455**, 31-36.

藤原 寛・山崎誠子・永塚弘樹, 2021, SPT
を用いた重液分離の一例：K-Ar年代測
定のための火山岩石基試料の分離. *地質
学雑誌*, **127**, 727-732.

Itaki, T., Taira, Y., Kuwamori, N.,
Maebayashi, T., Takeshima, S., Toya, K.,
2020, Automated collection of single
species of microfossils using a deep
learning-micromanipulator system.
Progress in Earth and Planetary Science, **7**,
19.

Isozaki, Y., Yamamoto, S., Sakata, S.,
Obayashi, H., Hirata, T., Obori, K.,
Maebayashi, T., Takeshima, S., Ebisuzaki,
T., Maruyama, S., 2018, High-reliability
zircon separation for hunting the oldest
material on Earth: An automatic zircon
separator with image-
processing/microtweezers-manipulating
system and double-step dating.
Geoscience Frontier, **9**, 1073–1083.

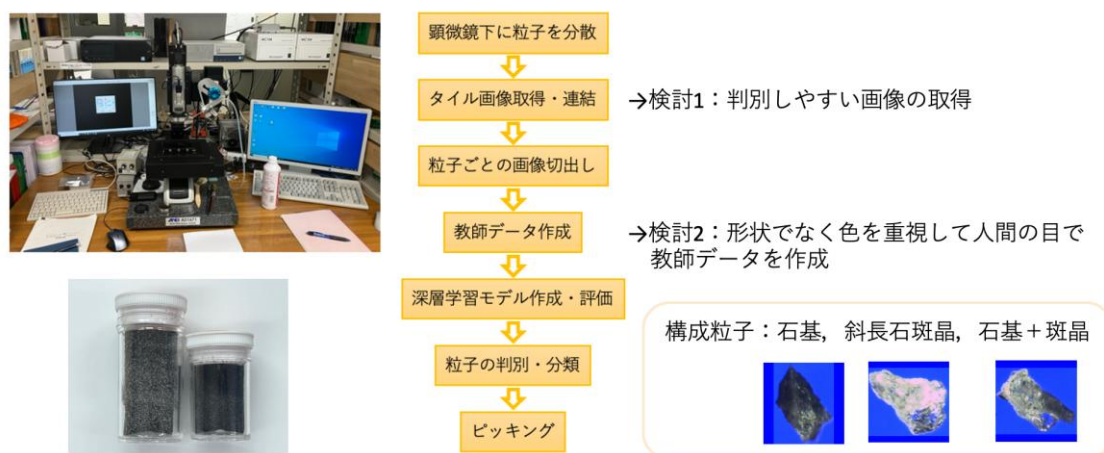


図1 本研究の流れと深層学習マイクロマニピュレータシステム
Fig. 1 Procedure of this study and the deep-learning micromanipulator system

第19回国際熱年代学会議開催 (Thermo2025) 開催報告 Report on the 19th International Conference on Thermochronology (Thermo2025)

長谷部徳子*・現地実行委員会委員
Noriko Hasebe * and Member of Local Working Committee

* : 金沢大学, Nihon University

Thermo2025 概観

2025年9月14日(日)~9月20日(土)に第19回国際熱年代学会議(以下Thermo)を金沢市商工会議所で開催した(図1)。日本地質学会に共催して頂いたが、不運なことに年会と一部重なってしまったため、共催の恩恵は限られていた。会場は貸切とし、1Fのホールを口頭発表の会場とし、2階をポスター発表の会場とした(図2)。会議の運営は株式会社PCO(富山県)に全面的にサポートを依頼し、ウェブサイトの作成、参加費の徴収、会場の設営・食事等の手配などを担当していただいた。これまで担当された会議は地球科学系とやや文化が異なるためか、英語の表記や地質巡検の手配など、不安になることもあったが、結果的にはお願いして良かったと感じている。

事前の準備にかかる情報共有にはSlackを活用し、月に1度オンライン会議を実施した。定常的に会議に参加して汗を流していただいた皆様はLocal Working Committeeのメンバーとして、実質的な会の運営に携わっていただいた。

会議に先立ち11日-13日には立山黒部アルペンルートを核とするプレ巡検も行った。詳細は中嶋(2025月号)に譲るが、PCO(株)経由でJTBに宿の予約やバスの手配をお願いしたところ、料金は高かったものの、ホテルや食事には大変満足であったとの感想を伺っている。

ポスターセッションおよび口頭セッションプログラムについては過去の多くの会議のフォーマットを踏襲した。すなわち月曜日から金曜日を学会とし、中日に巡検を入れる。前半2日間は基礎研究を、後半2日間は応用研究発表の場とする。ポスターも前半と後半で入れ替える。しかしながら基礎研究の発表数が少なめであったため、前半にも応用研究のセッションが開催された。これは発表申し込み数に合わせて口頭の枠を割り振ったせいであるが、そもそも応用研究のセッション数の方が多かったこともあり、基礎研究の口頭枠の割合を増やしても良かったかもしれない。

参加者数

会議には24カ国から205人の参加を得た。世界の中での日本の立ち位置である極東の島国での開催ということで、事前に参加者数を見積もるのが難しく、会議開催の準備には難渋したが前回のイタリア並みの参加者を得ることができた。半数はアジア・オセアニア地域から、1/4はヨーロッパから1/4は北米からの参加者であった(図3)。やはり日本開催ということで、ヨーロッパからの参加者は少なかったが、その分を中国からの参加者が埋めたことが見て取れる。2000年以降、ヨーロッパ外で開催されたThermoとしては2000年オーストラリア(約150人参加)、2008年アメリカ(約100人参加)、2012年中国(参加人数は不明だが

アブスト投稿数約 150 件、キャンセル多数)、2016年ブラジル(約 130 人参加)、および 2021 年アメリカ(コロナ禍により参加者はアメリカ国内在住者に限られた)があるが、その中では最大の参加者数を得ることができた。本会議は参加者数の点では成功だったと誇ることができる。余談になるが、中国からの若い参加者には、イヤホンで自動通訳機能を利用している人もいたようである。時代の流れを感じた。

ポスターセッション

前回の Thermo2023 (イタリア開催)では屏風状にジグザグに組んだポスターボードが用意された。そのため、議論できる場所が狭かったという声があったため、本会議ではスペースの確保に努めた(図 4)。その点は好評だったと思う。また学生賞(後述)を出す都合上、特に審査員の先生方は熱心にポスターを見て回ってくれた。発表した学生からはその点は大変喜んでもらった。ポスター会場に休憩時のお茶・コーヒーを受け取る場所を設けたため、口頭発表が再開される時に休憩から戻って来てもらうのに、やや難渋した。会場の制限でできなかったが、1Fにもコーヒースペースを設けることができたならさらに良かった。ポスターセッションの際にビールを出すかどうかということが議論になったものの、今回のポスターセッションの時間が昼食後であったため自重してアルコールは出さなかった。ただ、参加者には不評だったかもしれない。

中日巡検

かつての Thermo 会議では、バスを連ねて全員で同じところを巡ったため、参加者同士のいい交流の機会となっていた。参加者が増えるに従い、多勢での移動は道路や駐車場の都合で難しいため、同じルートでも時間を分ける、行き先を分けるなどの対策が過去の会議でも取られていた。今回はコースを複数用意することにより多人数参加者への対応策とし

た。4つのコースを用意したところ、どのコースもある程度の希望者が集まったことから4コースとも実施した。合計でバスを5台手配することになった。地震による地殻変動を間近に見る機会となった能登巡検は人気が高かった。4つの巡検コースの詳細の報告については、長田(2025 本号)、小形(2025 本号)、長谷部(2025 本号)、および末岡(2025 本号)を参照されたい。昼食についてはバスに乗る際にお弁当を渡すという案もあったが、学会開催時期であった9月中旬は、まだ酷暑であることの懸念もあり、衛生の観点から行った先で昼食を準備することにした。変更希望者がいたり、中日巡検を登録しなかった参加者がやはり参加を希望したりで、直前まで人数が確定せず、バスの定員数の確認や昼食の手配などで混乱した。中日巡検のアレンジには PCO(株)の会場担当者が対応してくれて大変助かった。

学生賞

Thermo2023 から始まった学生賞を本会議でも採用した(図 5)。Thermo2023 ではポスター発表を行なった学生のみが対象であったが、今回は口頭発表、ポスターセッション 1、ポスターセッション 2 と分けてそれぞれから受賞学生を選定した。Scientific Committee のメンバーの先生方に審査員をお願いしたが、結果として審査員には大変負担をかけることになった。ポスターの発表者には 1-min-short talk をお願いし、これが優秀学生の第 1 スクリーニングとして機能することを目論んでいたが、1分では短すぎて優劣はつけ難く、結局審査員の先生方には走り回っていただくことになり、大変負担をかけた。JpGU 方式で事前に審査員をつけて絶対評価にする案もあったが、時間的にそのような準備が難しく、また JpGU のように広い分野を包括した会議ではないため、誰がどれを審査するのか、選定もなかなか難しいように感じたため採用しなかった。また Award Subcommittee からは、若手向けの賞

(Charles and Nancy Neaser 賞) の受賞者をどのように決めるべきかの議論があげられたが、学生発表賞は若手の見える化の一端として、推薦者の手助けになるのではと思う。今後の会議でどのように学生賞が運用されるか未知数であるが、ぜひ続けるといいのではと個人的には思っている。学生発表賞には賞金を出したが、そのサポートは日本 FT 研究会がしてくださった。伏してお礼申し上げる。

ショートコース

本会議では特徴的なプログラムなどの利用法を主として、その背景にある原理やプロセスの理解も助けるショートコースが付随している(図6)。学生や若手向けの取り組みであるが、すでにこの業界でキャリアを積んだ研究者も参加して知見のリニューアルに努めることもある。今回は6つのショートコースを準備し、会議開催前の日曜日に2つ、火曜日に1つ、金曜日に1つ、会議後の土曜日に2つ開催した。熱年代モデルの構築に利用される HeFTy と QTQt のショートコースや統計プログラムのショートコースなどレギュラーコースに加えて、地球科学の Big Data の取り扱いに関するショートコース、地形発達解析に関するショートコース、構造発達史の研究に利用できるプログラムに関するショートコースを用意した。これらコースはボランティアの講師に支えられており、心より彼らに感謝したい。コースによっては事前の学習にも力を入れてくれており、その準備には並々ならぬ労力が割かれている。最終日のコースは、エントリーした人数に比して参加人数が少なかつたため、やや申し訳ない状況となってしまった。フライトの確保の都合上、プログラムは約2ヶ月前に公開したが、それでも少し遅かつたかもしれない。

おわりに

この会議は2年毎に開催され、開催年には熱年代学に貢献した研究者を表彰している。今年の会議では初めて日本人が表彰された(図7)。おめでとうございます。

最後になるが、共催機関として、広報やスポンサーの確保にご協力いただいた日本地質学会、固体地球科学セクションの下、表層変動熱年代学フォーカスグループを設置して学術コミュニティにおける認知度の熟成に貢献いただいた

JpGU、会議中の運営をサポートしてくれた学生の皆さん、スポンサーとして会議を支えてくれた京都フィッション・トラック(株)、電力中央研究所、石川県、金沢市、金沢コンベンションビューロー、金沢大学ダイバーシティ推進機構、島根大学総合理工学部地球科学科、アースサイエンス(株)、ブースを提供してくれた Lithodat と EPS に心よりお礼申し上げます。

引用文献

- 長谷部徳子, 2025, Thermo2025 中日巡検報告 (C コース: 金沢市). フィッション・トラック ニュースレター, **38**, 63-66.
- 長田充弘, 2025, Thermo2025 中日巡検報告 (A コース: 福井県立恐竜博物館). フィッション・トラック ニュースレター, **38**, 56-58.
- 中嶋 徹, 2025, Thermo2025 プレ巡検報告. フィッション・トラック ニュースレター, **38**, 51-55.
- 小形 学, 2025, Thermo2025 中日巡検報告 (B コース: 能登半島). フィッション・トラック ニュースレター, **38**, 59-62.
- 末岡 茂, 2025, Thermo2025 中日巡検報告 (D コース: 能登半島). フィッション・トラック ニュースレター, **38**, 67-69.



図1 参加者集合写真.

Fig. 1 Group photo



図2 会議の受付.

Fig. 2 A reception desk.

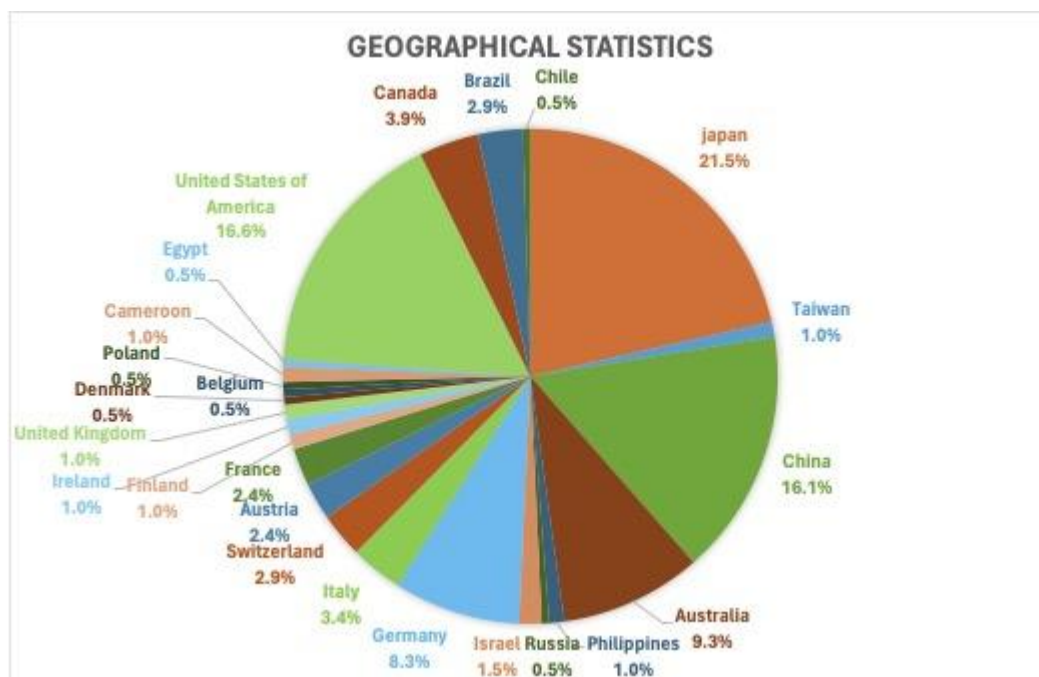


図3 国別参加者割合.
Fig. 3 Geographical statistics of participants.



図4 ポスターセッション会場.
Fig. 4 Poster session.



図5 学生発表賞受賞者.
Fig. 5 Outstanding student presentation awardees.



図6 ショートコース.
Fig. 6 Short course.



図7 受賞者.

左から Laslett 賞・田上高広, Dodson 賞・Jean Braun, Naeser 賞・Birk Härtel (敬称略).

Fig. 7 Awardees. Laslett prize to Takahiro Tagami, Dodson prize to Jean Braun, Naeser prize to Birk Härtel.

Thermo2025 プレ巡検報告

Report on the pre-conference field trip of Thermo2025

中嶋 徹*

Toru Nakajima *

*: 富山大学都市デザイン学部地球システム科学科, Department of Earth System Science, School of Sustainable Design, University of Toyama

巡検の概要

Thermo2025のプレ巡検(pre-conference field trip)は2025年9月11日-12日に開催された。巡検は飛騨山地北部を横断し、糸魚川静岡構造線沿いを北上、糸魚川に至るルート(図1)で行われた。飛騨山地北部には飛騨帯、飛騨外縁帯といった日本の地帯構造区分のなかでもとりわけ古い地質体から、地表に露出する深成岩体としては世界で最も若い黒部川花崗岩や立山弥陀ヶ原火山の活発な火成活動、氷河地形や有史の災害遺構など、島弧としての日本を特徴づける様々な年代の地質体、遺構が分布する。

プレ巡検の参加者は21人で、欧州、米国、中国からの参加者が主であった。案内人として原山智名誉教授(信州大)、伊藤久敏上席研究員(電中研)、中嶋徹助教(富山大)が参加し、また補助として金沢大より Ruby Marsden 連携研究員、立山カルデラ砂防博物館より丹保俊哉研究員が参加した。以下に各見学地点の記録を簡単に記す。

Stop1 大場の大転石

初日最初の見学地点は富山平野常願寺川左岸に位置する転石であった。本転石は1858年飛越地震の際に生じた山体崩壊による堰き止め湖の決壊により発生した大規模な土石流により運搬されてきたものである。現地では丹保研究員により詳細な解説が行われた。到着時は悪天候だったものの、数分後には雨が止み、そ

の後雲の切れ間から姿を表した立山連峰を遥拝できた。

Stop2 立山カルデラ砂防博物館

本地点では崩壊カルデラである立山カルデラの成り立ちと日本の砂防史を学ぶことができる。模型や映像、音声を用いた展示が非常に充実しており、直感的にわかりやすいように工夫がなされている。また、ピンポン玉を用いた雪崩実験を特別に実施していただき、こちらも参加者に非常に好評であった。

Stop3 悪城の壁

本地点では称名川左岸に称名滝溶岩の断面が300m程度の大露頭として分布する。何人かの参加者は溶岩よりも右岸側に露出していた飛騨の花崗岩類に興味を示していた。遠くに見える大露頭よりも目の前の小露頭に惹かれるのは地質学者の性であろうか。

Stop4 称名滝

称名滝は日本最大落差を誇る名瀑である。巡検当日は降雨の影響で幸運にも隣のハンノキ滝も姿を表していた。見学できるものはStop3と同様であるが、滝の迫力も相まってStop4のほうが好評だったように思われる。また、筆者がかつて行った称名滝登攀の解説も意外と好評であった。

Stop5 室堂

本地点ではミクリガ池，地獄谷といった弥陀ヶ原火山の火成活動の様子や赤壁の火砕岩類，雄山周辺の氷河地形を見学した。参加者の多くが活発な火成活動と縁遠い地域出身であるため，硫化水素の強烈な悪臭に一喜一憂する様子が伺えた。室堂出発時に本格的に雨が降り始めたが幸運にも昼食中であり，巡検の進行に深刻な影響はなかった。

Stop6 黒部ダム

黒部ダムの下流域は極端に速い削剥 (~10 mm/yr) が進行している地域であり，また黒部川花崗岩の分布域でもある。黒部ダムの迫力満点な景観も相まって本巡検のハイライトであった。本地点では関西電力黒四管理事務所の計らいで，ホーム裏のトンネルを抜けた先にある黒部川花崗岩の露頭を見学することができた。筆者は荷物を見張る関係でホーム付近に待機していたため，露頭においてどのような議論が交わされたのかは認知していないが，具体的な共同研究の話も持ち上がったようである。また，飛騨山地の隆起モデルについての議論も黒部ダム周辺で行われた。

Stop7 扇沢

扇沢駅周辺の河床には黒部川花崗岩の転石が多く分布している。水流で磨かれた巨礫は黒部川花崗岩を特徴づける「暗色包有岩」の組織観察に最適であり，ここでも議論が大いに盛り上がった。参加者の殆どは岩石学者ではないものの，原山教授の丁寧な説明により，その組織の学術的重要性は十分に伝わったように思われる。河床礫を持ち帰りたそうにしている参加者が多く見受けられた。

Stop8 小滝ヒスイ峡

小滝ヒスイ峡の見どころはヒスイ輝石岩であるが，筆者の説明が悪かったのか，参加者の多くはむしろ河床に転がる多様な岩種の巨礫に興味津々であり，

「この岩石は何か？」と質問攻めにされた。日本に住む筆者は普段あまり意識することがないが，チャートや斑れい岩といった岩石は米国や欧州，中国からの参加者にとっては馴染みが薄く，珍しいようである。河床の所々で議論が白熱し，時間を大幅に超過してもその熱は収まらなかった。

Stop9 フォッサマグナパーク

本巡検の最終地点である。糸魚川ジオパークのハイライトでもある糸魚川静岡構造線の露頭では，改めて中新世以降の中部日本のテクトニクスを解説を行い，議論が大いに盛り上がった。筆者の周りでは特に伊豆弧の衝突と関東・赤石山地の隆起についての議論が活発に行われた。また，枕状溶岩の露頭を経て最後に渡辺酒造店に立ち寄り，井戸水の試飲をして巡検は幕を閉じた。

巡検を終えての所感

案内人として巡検に参加した筆者の所感を一言でまとめるならば「課題はあるものの概ね成功裏に終わった」である。参加者の殆どが島弧地質に馴染みがなかったため，地質概要の説明には苦戦したものの，巡検案内書を充実させたことが功を奏した。また，Ruby 研究員による通訳に助けられる場面も多々あった。

巡検期間中は参加者が見学地点だけでなく，バスの中や食事，ホテルのレクリエーション(卓球)を通じて議論や親交を深める様子が見られた。学会が始まる前に親交を深めたことで，学会期間中のスムーズなコミュニケーションに繋がっていたようにも感じる。更に，巡検中に飛騨山地北部を対象とした共同研究の話が持ち上がる場面に幾度か出くわした。このような機会を通じて，国際的な認知度が高まるだけでなく，多くの研究グループが参入し，研究が進展することで，既往研究や地域そのものの重要性が認知されることが期待される。本巡検がその契機となれば幸いである。

一方、改善すべきと感じた点も少なくない。まず、宿泊料金が高額であり結果的に参加費が高額になってしまった。山地地形が発達した風光明媚な地域では、予約が困難であったり、宿泊料が高額であったりと、宿泊施設に関連する問題に直面しやすい。学会期間中に話した参加者の中には「参加費が高く、本巡検への参加を断念した」という方もいた。また、参加者からの意見として、相部屋でも構わないので、宿泊費を抑えたかったという意見もあった。地質学・地形学的魅力を維持しつつ、どこで参加費を節約するのかが、巡検を企画するうえで重要であると感じた。

また、ルート確定と宿の選定に時間がかかり、初期構想にあった室堂での宿泊が叶わなかった。参加者の中には活発な大学院生から高齢者まで様々な活動量

の方がおり、全ての参加者が同じ行程で満足感を得るのは困難だったように思う。室堂に宿泊し、行程に余裕が出れば、複数の班に別れて別行動をすることも可能だったかもしれない。前述の問題にも関連するが、可能な限り早期のルート決定と宿泊施設の確保が巡検の成功には欠かせないだろう。

数十人規模で2泊3日の行程となると、巡検としては比較的大規模である。そのため、株式会社PCOスタッフの方々、JTB、関西電力、補助として参加いただいたRuby研究員と丹保研究員、立山カルデラ砂防博物館の方々、その他Thermo2025現地運営委員の方々のサポートなしに、本巡検の成功はあり得なかった。深く感謝申し上げたい。

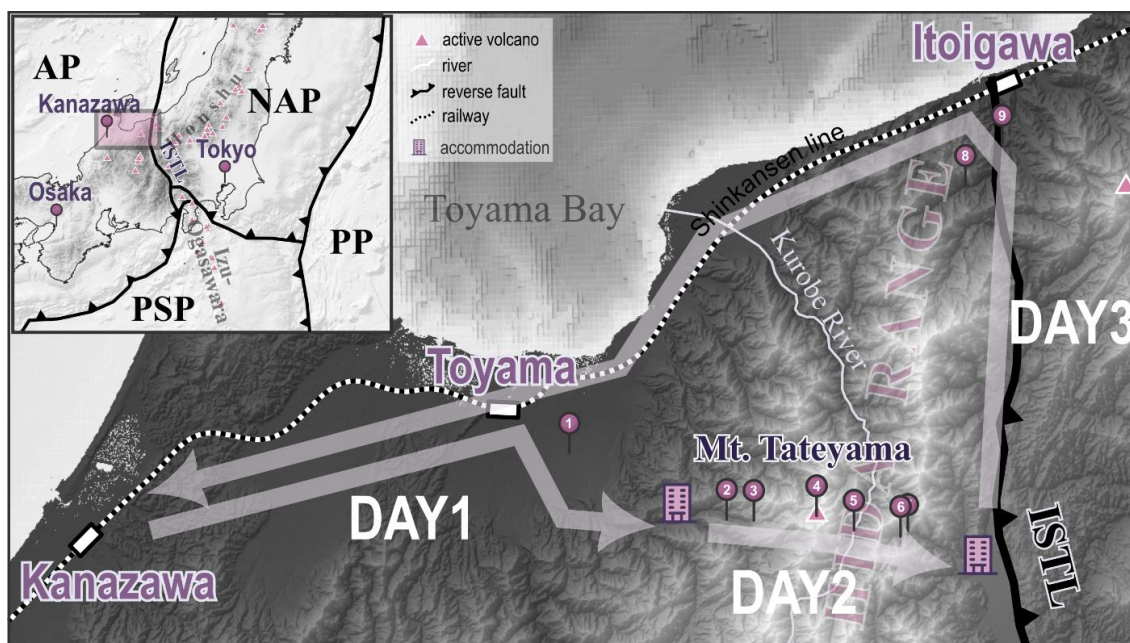


図1 プレ巡検の行程.

Fig. 1 Pre-conference field trip itinerary. AP: Amurian Plate; NAP: North American Plate; PSP: Philippine Sea Plate; PP: Pacific Plate; ISTL; Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line



図2 称名滝での集合写真.

Fig. 2 Group photo at Shomyo Falls.



図3 フォッサマグナパークでの集合写真.
Fig. 3 Group photo at Fossa Magna Park.

Thermo2025 中日巡検報告 (A コース：福井県立恐竜博物館)

Report on the mid-conference field trip of Thermo2025

(Course A: Fukui Prefectural Dinosaur Museum)

長田充弘*

Mitsuhiro Nagata *

*：日本大学文理学部地球科学科, Department of Earth and Environmental Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University

はじめに

北陸地方は、日本海に面するため、独特な地質がいくつも見られる。その背景にある原因の一つが日本海拡大であろう。正確な年代や成因は議論があるものの、おおむね中新世までにアジア大陸東縁から現在の日本の原型となるものが分離し、日本海が形成された。これにより、北陸地方では、①アジア大陸に位置していた頃の地質や岩石、②日本海の形成に伴って、形成された地層や岩石、および③日本海形成後に形成された地層や岩石を見ることができる。本巡検では、①と③の太古の日本を楽しんでもらう目的で福井県立恐竜博物館と東尋坊への巡検を企画した。巡検リーダーは岩野英樹（株式会社京都フィッション・トラック）と長田充弘で、参加者は24人であった。

Stop 1：福井県立恐竜博物館

福井県立恐竜博物館は、2000年に開館し、2023年にリニューアルオープンした。2024年度には来館者126万人を達成する等、日本で人気の博物館である。

Thermo2025の会場である金沢商工会議所から福井県立恐竜博物館に到着するまでは、北陸自動車道から中部縦貫自動車道を経由して、移動した。高速道路が少し混んでいたため、やや到着が遅れた。高速道路を降りて、福井県勝山市に入ると、遠くに銀色のドーム状の建物が

見えた。「あれは何だ？」と参加者に尋ねると、「Dinosaur egg!」と声があがった。福井県立恐竜博物館に到着すると、まず、博物館前で集合写真を撮影した(図1)。尚、この集合写真中で、多くの参加者がスリーピースをしているのは、筆者の指示によるものである。これは、福井県勝山市から発見されたフクイラプトル(図1の写真中央の恐竜)をはじめとする多くの肉食恐竜(獣脚類)の前脚は3本指であるためである。通常のスリーピースは人差し指、中指、および薬指で表現するが、ここは恐竜博物館であるため、上述の恐竜を忠実に再現(リスペクト)し、親指(第1指)、人差し指(第2指)、および中指(第3指)を使用してのスリーピースとした。読者の方々も福井県立恐竜博物館に来館された際は、このスリーピースで写真撮影することをお勧めする。もし、ティラノサウルスが好きな方は、前脚が2本指であるため(正確には退化した第3指がある)、親指(第1指)、人差し指(第2指)でのピースサインをお勧めする。

チケットを参加者に配った後、参加者は正面のエスカレーターを降りて、各自思い思いに館内を閲覧した。今回の巡検では、時間の関係上、勝山市の恐竜発掘現場付近で発掘体験をする「野外恐竜博物館」や化石について様々な体験ができる「化石研究体験」は利用できなかったものの、常設展に加えて、2025年7月～

2025年11月まで行われている福井県立恐竜博物館開館25周年を記念した特別展「獣脚類2025～「フクイ」から探る恐竜の進化～」を楽しんだ。この特別展では、これまで発見された福井県勝山市で見つかった恐竜化石やそれらの最新の研究成果、およびそれらに関連する世界の恐竜たちが展示されていた。中でも、天井から宙づりで展示されていた人気の恐竜スピノサウルスの最新復元骨格は、多くの参加者が写真を撮っていた。多くの参加者がミュージアム・ショップでお土産も買っていたので、満足だったようである。

Stop 2 : 東尋坊

福井県立恐竜博物館を楽しんだ後は、東尋坊に移動した。バスで昼食をとったが、ベジタリアンの方々を除いて、チキンを使った弁当であったため、鳥の祖先が恐竜であることから、参加者に「Here is your dinosaur lunch box!」とお茶（もしくは水）を渡すと、笑顔で受け取っていた。参加者は、美味しそうに弁当を食べながら、山から海へと変わっていく福井の風景を楽しんでいた。

福井県坂井市の東尋坊は、日本海の荒波が岩に打ち寄せる、荒々しくも美しい景観が有名な場所である。地質学的には、米脇層東尋坊火山岩（安山岩）類と呼ばれており、柱状節理が発達している。参加者の多くは、比較的行きやすい崖の先端付近でポーズを決めて、写真を撮ったり、柱状節理独特の綺麗な六角形を探したりしていた（図2）。何人かは日本人でも行かないような崖の先端まで行っており、一部の巡検参加者の底知れぬ熱意を感じた。筆者が恐竜博物館での参加者の反応を見ていないからと思いたいが、東尋坊の方が巡検参加者のウケが良いような気がした。巡検は、やはり実際の地質や地形を見る方が参加者のウケが良いのかもしれない。巡検当日は暑かったため、東尋坊のすぐ近くにある商店街でジュースやアイス等を買っている参加者もいた。

ちなみに、東尋坊という名称は、平泉寺にいた生臭坊主、東尋坊の名に由来する。東尋坊には、以下のような複雑なエピソードがある。尚、以下では、混乱を避けるため、それぞれ東尋坊（人名）と東尋坊（地名）と表記する。東尋坊（人名）は、品行が悪く、綾姫という美女に恋をしていた。ある日、東尋坊（地名）で酒盛りをしていた所、恋敵であった真柄覚念という僧侶に東尋坊（人名）は崖から突き落とされてしまう。東尋坊（人名）が転落した後、東尋坊（地名）の周囲の海はしばらく激しく荒れた。これは東尋坊（人名）の未練（怨念）が原因とされる。東尋坊（地名）から見える日本海は、季節によって荒れることが知られているが、これは東尋坊（人名）の怨霊の表れなのかもしれない。しかし、巡検当日は晴れて海も穏やかであり、少なくとも我々は東尋坊（人名）に恨まれなかったようである。

おわりに（謝辞）

まず、本巡検は、岩野英樹博士の尽力が大きかったということを強調しておきたい。岩野博士は、福井県出身ということもあり、バス内などでのアイスブレイク・ガイド等を率先してやっていただいた。彼のガイドには、多くの参加者が笑いながら、興味深く彼の話聞いていた。田村明弘博士（金沢大学）と株式会社PCOのスタッフの方々には、筆者が大学の海外実習等で忙しい際に、岩野博士と共に本巡検に関わる様々な手続きを進めていただいた。また、時哲君、相原要生君、および土屋阜葉君（金沢大学学生）には、受付や巡検参加者への対応にご助力いただいた。さらに、ふるさと茶屋 縄文の里のスタッフの方々には、巡検当日が定休日であったにも関わらず、ベジタリアンの方々のための弁当を用意し、福井県立恐竜博物館まで運んでくださった。以上の皆様の協力なしに、本巡検の成功はありえなかった。ここに記して深く感謝申し上げたい。



図1 福井県立恐竜博物館での集合写真.
Fig. 1 A group photo at the Fukui Prefectural Dinosaur Museum.



図2 東尋坊の柱状節理にのる巡検参加者たち.
Fig. 2 Field trip participants standing on the columnar joints at Tōjinbō.

Thermo2025 中日巡検報告 (B コース : 能登半島) Report on the mid-conference field trip of Thermo2025 (Course B: Noto Peninsula)

小形 学*
Manabu Ogata *

* : 日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

はじめに

2024年1月1日、能登半島でマグニチュード7.6の大きな地震が発生した。この地震の影響は広く、能登半島のみでなく周辺地域にも甚大な被害をもたらした。本巡検は、地震に伴う地形変化を見学いただくこと、また地震の被害に対する復旧・復興について考えていただくことを目的として企画されたものである。巡検リーダーはロバート・ジェンキンス准教授（金沢大学）と小形学（原子力機構）で、参加者は約80名であった。

Stop 1 : 西荒谷小学校周辺 (内灘町)

内灘町は、内灘砂丘を有し、主に、内灘砂丘頂部と内陸（東）側の麓に住宅地が発達する地域である。2024年能登半島地震の際に、内陸側の山麓域で深刻な液状化被害を受けた。内灘砂丘の内陸側は、標高が河北潟に向けて緩やかに傾斜する。西荒屋地区周辺ではやや急峻化するが、県道162号線以東はやや平坦になる。能登半島地震の際には、液状化した砂丘の砂質堆積物が傾斜によって下方（側方）に流動し、平坦面に乗りあがる形となり、広範囲に隆起、沈降、地割れが発生し、建物、道路、ライフラインに甚大な被害を与えた。

当初は西荒屋小学校敷地内で巡検を行う予定であったが、工事が行われていたため、西荒屋小学校周辺の見学を行った。傾斜地の液状化による側方流動の被害を肌で感じていただけたかと思う。

Stop 2 : 琴ヶ浜

琴ヶ浜は、「鳴き砂」や黒崎安山岩が有名な観光地である。琴ヶ浜の砂浜は石英を豊富に含み、乾燥した状態で踏むときしむ音をたてるため、「鳴き砂」と呼ばれる。この石英粒子は能登半島内陸の基盤岩であるジュラ紀の花崗岩由来とされる。黒崎安山岩は琴ヶ浜の基盤岩である石灰質砂岩に貫入する。貫入の根拠となる黒崎安山岩の見事な柱状節理は、2024年能登半島地震に伴い大きく崩壊してしまっただが、未だ地質学的にも観光資源としても貴重である（図1）。

琴ヶ浜では、能登半島の複数の地質学的特徴と地震による岩盤崩落を興味深く観察いただくとともに、日本の砂浜の波打ち際をお楽しみいただけたと感じた。

Stop 3 : 鹿磯漁港

鹿磯漁港は、2024年能登半島地震によって約4mの隆起が生じた場所である。このことは各メディアでも大きく報道され、一時は復旧も危ぶまれていた。しかし、現在は埋め立てによる応急復旧が完了しており、一部の漁業が再開している。漁港の外縁では、隆起によって海底岩盤が広く露出している。岩盤は約1,600万年前の河川からデルタにかけての堆積物由来の堆積岩である道下層に属するため、日本海形成時の堆積環境の推定の一助となると考えられる。また、露出した海底岩盤上には、隆起による干出

で局所的に死滅したムラサキウニや二枚貝類、サンゴ類の生物遺骸を確認した。

鹿磯漁港では、地震による隆起の様相とそれに対する地域社会の回復力、また、隆起によって露呈した古代の地質と現代の生物学的特徴など、多種多様な情報を同時に観察できる稀有な体験を提供できたと考える。また、隆起した防波堤を背にしたグループフォトは、本巡検の重要な記録となるだろう（図2）。

Stop 4 : 白米千枚田

白米千枚田は、世界農業遺産に登録された「能登の里山里海」を代表する景観の一つである。能登の海岸線は段丘崖による急斜面が多く、耕作に適した平坦地が少ない。そこで、地すべりによって形成された緩やかな斜面に整備されたのが白米千枚田である。1,004枚の田んぼから成る美しい棚田であったが、2024年能登半島地震とそれに続く豪雨によって亀裂や地すべり等の甚大な被害を受けた。これらの出来事は、こうした地形では自然災害に対するリスクが高いことを浮き彫りにする形となった。一方で、地震災害によって利用できなくなった道路の迂回路として、新たに隆起した海岸が利用されており、地形変化を逆手に取る強かさが人の営みの力強さを感じさせる。

白米千枚田では、能登半島における土地利用といった文化的景観や、地形変化が激しい地域で直面する課題等を紹介することができた。

Stop 5 : 黒島漁港

黒島漁港は、2024年能登半島地震に伴う隆起の顕著な事例の一つである。約

3.6mの隆起によって、岸壁や防波堤は現在の海面を上回り、かつて海であった港内が広く砂浜となっている。露出した岸壁には、固着性のゴカイ類の棲管や貝類などの生物遺骸が固着しており、地震以前の潮位を示す明確な根拠として利用できると考えられる。

巡検の時間の都合上、岸壁からの見学のみとなったが、かつて海であった名残の生物遺骸が点在する広い砂浜を見ていただくことで、地震による影響の凄まじさを感じていただけたかと思う。

おわりに

巡検当日はあいにくの雨であったが、巡検参加者の皆様には現代に生じた大規模な地形変化を興味深くご見学いただけたかと思う。これを機に自然災害に対する支援についても考えていただければと願う。

金沢大学のロバート・ジェンキンス准教授には、本巡検の巡検箇所の発案、巡検ガイドブックの作成、および当日の巡検ガイドを行っていただいた。金沢大学のRuby C. Marsden 特任助教には、巡検ガイドを補助していただいた。電力中央研究所の伊藤久敏博士および金沢大学の田村明弘博士には、巡検コースの選定の際に貴重なご意見をいただいた。金沢大学と京都大学の学生諸氏には、受付や巡検参加者への対応にご助力いただいた。また、内灘町役場教育委員会および石川県漁業協同組合門前支所の皆様には、巡検にあたりお世話になった。以上の方々に心より御礼申し上げます。



図1 崩落した黒崎安山岩 (於・琴ヶ浜).
Fig. 1 Landslide of the Kurosaki Andesite (at Kotogahama).



図2 集合写真（於・鹿磯漁港）.
Fig. 2 A group photo (at Kaiso Fishing Port).

Thermo2025 中日巡検報告 (C コース : 金沢市)

Report on the mid-conference field trip of Thermo2025 (Course C: Kanazawa City)

長谷部徳子*
Noriko Hasebe *

* : 金沢大学, Kanazawa University

はじめに

Thermo2025 のホストとなった金沢市は歴史と文化を押す観光都市であるが、実は地球科学的な見所も多い。犀川と浅野川の下刻・堆積により形成された河岸段丘や、その削剥・堆積環境の変動に一役かった氷期・間氷期変動を堆積相として記録する大桑層など、金沢市の地形・地質の成り立ちに関連する場所に合わせ、歴史的な（主として江戸時代の）側面にも光を当てながら、金沢市巡検を企画した。

参加者は 35 名で巡検リーダーは北村晃寿（静岡大）と長谷部徳子（金沢大）が担当し、他に田村明弘および学生のサポーターとして奥村玲音・ガンバットシューハーズ（金沢大）が運営に協力した。また Local Organizing Committee の代表である田上高広先生もこの巡検に参加され、海外からのゲストのおもてなしに大きく貢献された。

Stop 1 と 2 : 大桑層

石川県金沢市から北海道大島半島に至る日本海沿岸には、鮮新世から更新世前期～中期の海洋性堆積層が分布している。金沢市に分布する大桑層もそのうちの一つであり、犀川の河岸に、貝殻橋から大桑橋の間約 1.2km にわたり、連続的に露出している。大桑層の堆積相は氷期・間氷期変動による海水準の変化や海水温を反映して貝殻化石が密集した層と乏しい層の繰り返しが観察され、またそ

の生物種も変化する。当日は大変蒸し暑かったが、参加者は豊富に含まれる化石を観察し、また河原の草の種にくっついてそれを取るのに悪戦しながら、リーダーの説明に聞き入った。集合写真はあまりの暑さのために木陰で撮影し、残念ながら鮮明さに欠けるが、後ろには貝殻橋がチラッと垣間見える（図 1）。

Stop 3-5, 8 : 河岸段丘と辰巳用水, 金沢大学

金沢市を歩くと坂が多いことに気づく人がいると思う。特に片町・香林坊地域、もしくは東茶屋街地域から、兼六園を目指す時、どの入り口から入るにもかなりの急坂を登ることになる。これは兼六園が小立野台地と名付けられた河岸段丘の上にあるためである。小立野台地の西には犀川が、東には浅野川が流れ、この二つの川に沿って河岸段丘が発達している。河岸段丘の形成は大桑層でみた氷期・間氷期海水準変動とも密接に関係する。卯辰山の見晴台から西を見ると、きれいに段丘地形がみえる。巡検の最後にこの見晴台に寄り、巡検のコースの総括を行った。午前中は、小立野台地が馬の背状に狭くなり東西の河岸段丘を見下ろせる場所があるためそこに案内した。また小立野段丘の上にある兼六園に水を供給する辰巳用水に沿う遊歩道を散歩し、辰巳用水の歴史的な役割や用水の石管に利用された石材について紹介した。遊歩道は竹林に囲まれており、京都の嵐山の

竹林が人気観光地であることから、ぜひ案内しようということになったが、好評だったかどうかは定かでない。途中、塩硝蔵の跡地があり、看板によりその縁を辿ったが、やはり遺跡や何らかの復元設備でもないと、印象には残りにくいだろうと思う。また辰巳用水の取水口がある辰巳ダムにも案内した。取水口本体は谷の下の方に見下ろす場所にあり、場所を知っていないとなかなか見つけられないが、資料として、手彫りのトンネルの写真の掲示などがあり、辰巳用水の建設にどれくらいの人的資源が投じられたかイメージを持ってもらうことはできた。昼食は金沢大学でとり、大学の入り口にある石碑で記念撮影を行った(図2)。

Stop6-7,9 : 文化体験と地球科学

午後は金沢の奥座敷とよばれる湯涌地区を訪れた。ここには江戸時代に利用されていた建物が移築された「江戸村」がある。江戸村には武士の家、農家の家、殿様が泊まる陣屋があり、参加者は実際に中に入り建築様式の違いを見ることができる。日本の古い文化を実体験できるコーナーも充実しており、畳の上で風を感じながらゆっくりする参加者もいれば、活発に、綿花から糸を紡いだり、竹馬に乗ったり、コスプレしたりする参加者もいて、とそれぞれ楽しんでもらえたのではないかと。驚いたのが竹馬の乗り方で、日本では足を板に平行に置くのが一般的であるが、垂直に足をおいて(板をお互いに向き合わせて足をのせる)上手に歩いていた参加者もいた(図3)。聞けば子供の頃、そのように乗っていたとのこと。調べてみるとドイツでの竹馬の乗り方のようなであった。また湯涌地区には温泉や足湯がある。足湯は多くの人が気軽に楽しんでいたが、温泉にも浸かった猛者もおられた(図4)。湯涌になぜ

温泉があるのかは浅学にして不明だが、この地域は白山から戸室山へとつながる白山火山列にのっているため、何らかの熱源が機能しているのかもしれない。

また学会会場に戻った後は、希望者とともに会場の隣りにある尾山神社へ歩いて向かった。尾山神社は金沢の一宮と言ってよい人気の新年のお参りスポットであるが、ここの門はステンドグラスが嵌め込まれており、印象的な観光スポットでもある。しかしぜひ見てもらいたいのには支柱をなす戸室石である。戸室石が取れる戸室火山は金沢大学よりさらに奥にあり、かつては金沢大学の学生実習などでも露頭を訪れていたが最近は植物に覆われてしまい現地には行きにくくなってしまった。しかし、尾山神社ではこの戸室石を労することなく観察できる。戸室石には青戸室と赤戸室があり、かつて金沢大学に在職されていた石渡 明先生がその成因を研究されていた。尾山神社では二つの戸室をきれいに並べて美しく飾っている。もっと注目されていい観光資源である。

おわりに

今回はシティツアーということで気軽に参加したい人が登録してくれたかもしれないが、結局ガッツリとした地学ツアーだったと、最後の卯辰山見晴台で、参加者が感想を漏らしていたのが印象的だった。午後は湯涌地域で過ごしたが、街中を流れる辰巳用水や、各所で利用されている石材の紹介、金沢市内のモール泉での温泉体験なども面白い巡検ツアーになったかもしれない。金沢市ではないが、手取川 Geopark 巡りもよい巡検コースの候補である。まだまだ案内できるところがあった。今回のメニューが良かったのかどうか、今も自問自答している。



図1 大桑層の観察サイトにおける集合写真.
Fig. 1 A group photo at the Omma Formation site.

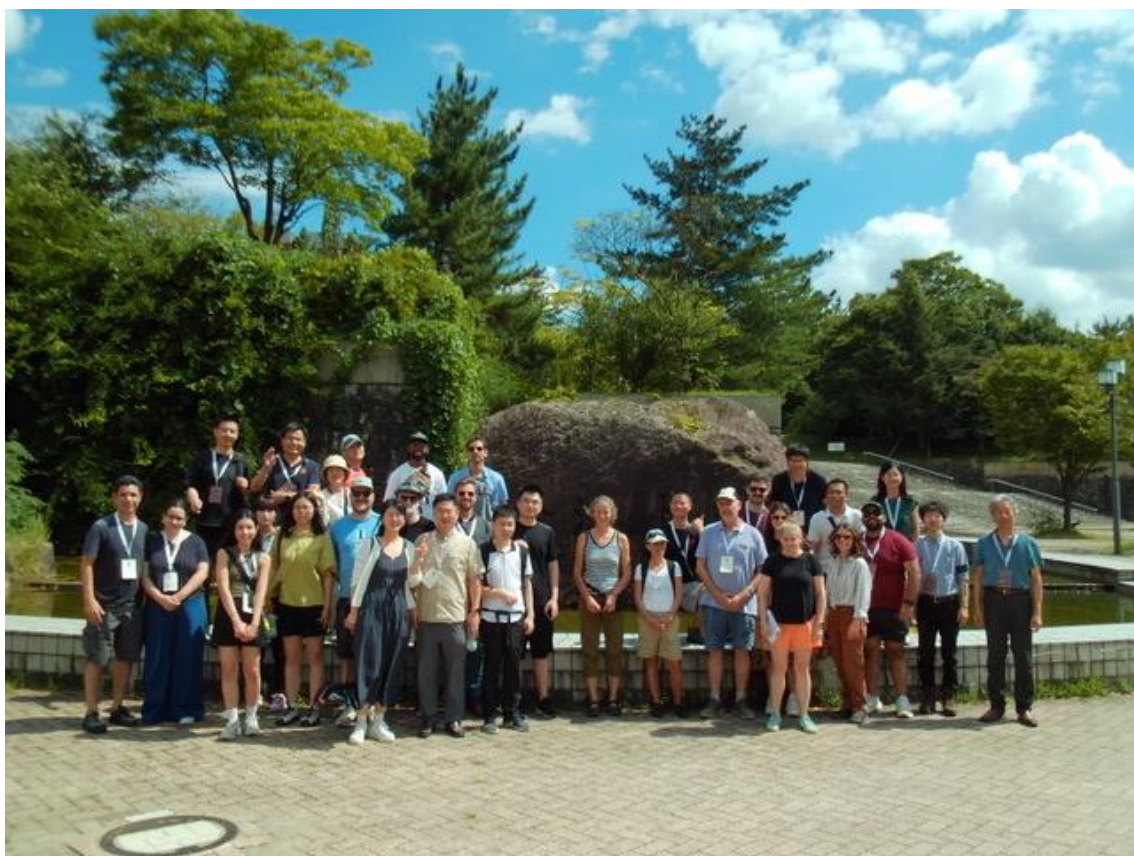


図2 金沢大学における集合写真.
Fig. 2 A group photo at Kanazawa University.



図3 竹馬の乗り方の国際的違い.
Fig. 3 International difference on Takeuma (stilts) techniques.



図4 足湯.
Fig. 4 Footbath experience.

Thermo2025 中日巡検報告 (D コース : 酒造巡り) Report on the mid-conference field trip of Thermo2025 (Course D: Brewery Tour)

末岡 茂^{*,**}
Shigeru Sueoka ^{*,**}

* : 日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

** : 国際唎酒師, International Kikisake-shi

はじめに

石川県や富山県を含む北陸地方は、冷涼な気候、豊富な水資源、盛んな稲作といった好条件に恵まれ、国内でも有数の日本酒の産地として知られている。本巡検は、その中でも富山県における酒造と伝統文化を対象とし、参加者が実際に体験・理解を深めることを目的として企画されたものである。巡検リーダーは梶田侑弥（京都大）と末岡 茂（原子力機構）で、参加者は全26人であった（当初の参加予定は27名だったが、1名は当日欠席した）。

Stop 1 : 梶田酒造店 沙石

沙石は、満寿泉の銘柄で知られる梶田酒造直営の店舗である。酒の販売よりも試飲に力を入れており、ここでしか飲めない限定品を含む、約100種類の酒を取りそろえている。本巡検では、制限時間15分のコースで試飲を行った（なお、30分のコースも用意されている）。限定品の中には、長期間貯蔵された古酒や、ワインやウィスキーの樽で熟成された酒、さらには水の代わりに清酒で仕込まれた貴醸酒など、実に多彩なものが含まれていた。日本酒の奥深い世界を海外からの参加者に伝えるうえで、まさに最適な場であり、巡検の最初の訪問地としてふさわしい場所であったと言える。また、沙石が立地する岩瀬地区は、江戸時代に北前船の港町として栄えた歴史を持ち、今も古い町並みが保存されている。試飲の

後、参加者たちはその街並みの散策も楽しんだようである。

Stop 2 : ますのすしミュージアム

ますのすしは、富山県を代表する伝統的な食品の一つである。一般に普及している握り寿司や巻き寿司とは異なり、サクラマスを用いた押し寿司の一種に分類される。その起源は江戸時代にさかのぼり、一説には、1717年に富山藩士・吉村新八が、藩主・前田利興や将軍・徳川吉宗にサクラマスの寿司を献上し、好評を博したことに端を発すると言われている。本巡検では、ますのすしを中心とした伝統的な料理を昼食として楽しんだほか、ミュージアム内の展示や工場の見学を通じて、ますのすしの歴史や雑学、製造工程について学ぶことができた。昼食には、生魚、昆布、ホタルイカなど、伝統的な和食の食材が多く使われていたため、海外の参加者からの評判が懸念されたが、概ね好評であったようである。

Stop 3 : 吉乃友酒造

吉乃友酒造は、1877年に開業した酒蔵であり、伝統的な製法による純米酒造りにこだわっていることで知られる。本巡検では、酒蔵内部を見学し、酒造りの工程について一通り解説を受けた後、日本酒の試飲を行った。吉乃友酒造の代表銘柄は「吉乃友」であるが、今回主に試飲したのは「后 (kisaki)」という銘柄であった。北陸地方の日本酒は、一般に淡麗辛口の味わいを持つものが多いが、

「后」は甘口系を中心としつつ、味の方向性や精米歩合、アルコール度数の異なる複数のグレードが展開されており、日本酒初心者から上級者まで幅広く楽しめる造りとなっていた。個人的には、瓶内二次発酵によって作られたスパークリング日本酒が特に印象的であった。ただし、これは現在のところ試飲用のみで、商品化はされていないとのことである。

Stop 4 : 能作

富山県高岡市は、江戸時代初期から銅器をはじめとする鑄造で知られ、三大大仏の一つに数えられる高岡大仏をはじめ、日本各地に残る銅像や銅製品からも、その高度な鑄造技術をうかがい知ることができる。能作は1916年に鑄物の製造を開始し、現在は錫や真鍮を用いた鑄物の製造を主に手がけている。特に錫の加工においては、通常、硬度を高めるために他の金属を加えるところを、あえて加工が難しい純錫（錫100%）による鑄造を行っている点に特徴がある。本巡検では時間の制約から売店で買い物のみの訪問となったが、工場見学や鑄物製作体験といったアクティビティも充実していることを付記しておく。

おわりに

Thermoは熟年代研究者の学会であり、中日巡検では、何らかの特徴的な地質・地形が観察できる地点を巡るのが通例である。しかし、本巡検は文化的な側面に焦点を当てたという点で、これまでにない特異な巡検であった。日本酒は、海外への輸出量が増加傾向にあるとはいえ、依然として高品質な日本酒を日常的に入手することは、海外では必ずしも容易ではない。そのような状況の中、参加者が酒蔵見学や試飲をどの程度楽しめるのか、当初は懸念もあった。しかし、終わってみればそれは杞憂に終わった。特に印象的だったのは、醸造工程を理解した上で、純米酒や生酒が飲みたいといった具体的な好みを伝えようとする参加者が何人も見られた点であり、日本酒に対する関心の高さと、その奥深さへの理解が進んでいることを実感した。日本国内では、嗜好の多様化により日本酒の消費量は減少を続けているが、海外市場に目を向ければ、日本酒の将来には大きな可能性があると感じられた。



図1 日本酒の試飲 (於・沙石).
Fig. 1 Sake tasting (at Saseki).



図2 集合写真 (於・能作).
Fig. 2 A group photo (at Nousaku).

私が見てきた熱年代学の変遷

Development of thermochronology in my view

田上高広*

Takahiro Tagami *

*: 京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻, Division of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Science, Kyoto University

熱年代学とは、放射年代測定の手法と鉱物ごとに被熱応答性が異なることを利用して、母岩の熱史を定量的に復元する学問分野である。1960年代には、地質学的加熱イベントによって放射年代時計がリセットされる際に、応答が有意に異なることが明らかになっていた (Hart, 1964)。一般に、親核種よりも娘核種の方が鉱物中の熱拡散速度が速いため、放射年代の被熱応答性は娘核種の熱拡散係数により支配される。母岩の温度上昇に伴って、娘核種が鉱物から熱拡散により散逸すると、放射年代測定の必要条件である閉鎖系が破れて開放系となってしまう。母岩の温度が下降すると、散逸は止まり閉鎖系が保たれるようになる。この境目となる温度は閉鎖温度 (Closure temperature; または Blocking temperature) と呼ばれ、母岩の冷却過程を双曲線関数で近似することにより初めて定式化された (Dodson, 1973)。

このブレイクスルーに続く1970年代から80年代において、ヒマラヤ・アルプスなどの世界の造山帯を舞台に、山脈の隆起—削剥—冷却を定量的に復元する研究が大きく花開いた (Wagner et al., 1977; Zeitler et al., 1982)。1970年頃に確立されたプレートテクトニクス理論により、プレート収束域である変動帯の大枠は明らかになっており、そこに長い時間スケールの変動現象を定量的に復元できる新たなツールがもたらされた。熱年代学の黄金時代の始まりであり、その中心

となった手法が Ar/Ar 法とフィッショントラック (FT) 法であった。

1984年夏に米国ニューヨーク州トロイ市において、第4回国際 FT 年代測定ワークショップが開催されたが、そこでも研究動向の中心は熱史研究であり

“Thermochronology (熱年代学)” という言葉がこの頃から広がり始めた。その中心となったのがオーストラリア・メルボルン大学の一連の研究であり、Andy Gleadow による40分に及ぶ基調講演において、FT年代だけでなく FT 長測定の重要性と石油堆積盆研究の新展開が紹介された。この頃から1990年代にかけて、FT 長測定方法・FT 熱アニーリング関数・熱史逆解析プログラムなど、現在につながる FT 熱年代学の基盤が整えられていった。1988年夏にフランス・ブザンソンにおいて開催された第6回国際 FT 年代測定ワークショップにおいては、いくつかのグループから FT 長測定方法・FT 熱アニーリング関数についての発表があり、特に Paul Green を中心とするメルボルン大学の研究は、その後の熱史定量モデリングの先駆けとなった (Green et al., 1989; Crowley, 1985)。この流れは、1990年代に熱史逆解析の実用化として結実していく (Lutz and Omar, 1991; Gallagher, 1995)。

その頃、もう一つの大きなうねりが希ガス年代の分野からもたらされた。FT 法よりさらに閉鎖温度の低い (U-Th)/He 熱年代学の誕生である。(U-Th)/He 法は、最初に試された放射年代測定法であ

ったが、地質学的に意味がない異常に若い年代を与えたため、使えないものとして長く忘れられていた (Hurley, 1954) . 1980年代に入り、オーストラリア国立大学の研究グループにより閉鎖温度の低い手法として再評価され (Zeitler et al., 1987) , 1990年代以降カリフォルニア工科大学の Ken Farley 達によって拡散過程の研究や天然試料への適用が一通り行われ、熱年代学に広く用いられ始めた

(Farley, 2002) . 特に医療用の白金マイクロパケットを用いた巧妙なレーザー加熱法により、単結晶レベルでの熱年代測定が可能となった (House et al., 2000) . 当時のカリフォルニア工科大学は世界から熱年代関係者が集う新たなホットスポットとなっており、そこから現在の(U-Th)/He 熱年代学を牽引する若い研究者達が世界へと羽ばたいて行った。それは同時に、FT 熱年代学との合わせ技で、

「低温領域の熱年代学」という新しい研究ジャンルが確立されたことも意味した。結果、2000年頃から、アパタイトとジルコンの(U-Th)/He, FT, (U-Th)/Pb法を組み合わせる分析が、熱年代学的応用研究の基本ルーチンとなった。2000年夏 (@南半球) にオーストラリア・ローンにおいて開催された第9回 FT 年代測定 & 熱年代学国際会議は、その熱気に包まれ大変暑い (そして、大陸中央の砂漠地帯からローンに熱波が押し寄せてきて、実際猛烈に暑い) 1週間であった。

その後、2000年代において重大な論点となったのが、古いアパタイトに適用する際に見出された (U-Th)/He 年代と FT 年代の逆転現象とその要因であった。当時考えられていた閉鎖温度は、FT が約 100°C, (U-Th)/He が約 70°C であったので、岩石が通常の地質学的な冷却史を反映する場合 FT 年代の方が古くはるはずである。ところが、岩石の年代が古くなるに従い、両者は接近し逆転することが広く見出され始めた (Hendriks and Redfield, 2005; Green et al., 2006) . どちらかの (または両方の) 熱年代システムのどこかに不具合があるはずなので、両

手法間で論争が加熱した。決め手となったのは、石油堆積盆解析で広く用いられるビトリナイト反射率などの被熱指標で、それらとの比較から(U-Th)/He 年代側に問題があることが明らかになった。つまり、(U-Th)/He 法の閉鎖温度は、用いる鉱物の年代 (正確には放射線による被曝量) に応じて変化することになる。したがって、その後の応用研究では、この点の評価が熱史解析において不可欠になっている (Guenther et al., 2013) .

このように、2000年頃に「低温領域の熱年代学」が脚光を浴びるに伴い、世界の大地帯での隆起—削剥—冷却履歴の研究がさらに進展し、大枠が完成されることとなった。熱年代学という学問領域は見事に金字塔を打ち立てたのであるが、研究サイクルの必然的帰結として、基盤岩の解析においては最先端研究の余地が次第に小さくなっていく。変わって、地球環境問題のクローズアップも背景として、徐々に研究の重心となったのが、地球表層での物質移動の指標となる熱年代シグナルの利用、いわゆる、

「Detrital thermochronology」である

(Bernet and Spiegel, 2004; Malusa and Fitzgerald, 2019) . 堆積物中の鉱物粒子ごとの年代—熱年代情報から、供給源となる後背地の隆起—削剥—冷却履歴に加えて、物質供給/移動に関する情報も得られるため、他の堆積学的/地球化学的指標と合わせて広く用いられている。

熱年代学のもう一つの方向性としては、局所的な熱現象の解析が挙げられる。従来から、マグマ貫入による基盤岩への接触型変成作用を伴う熱影響の評価に、熱年代学は広く用いられてきた

(Hart, 1964; Calk and Naeser, 1973) . 年代測定技術の進展に伴う単粒子年代測定の普及により、さらに高い空間分解能が必要な熱現象にも適用が試みられるようになってきた。その代表が断層帯の熱年代学である (Tagami, 2012, 2019) . 断層面における剪断変形による摩擦発熱や、断層帯の高い浸透率を持つ領域における熱水移動を、母岩の被熱イベントとして

熱年代学的に検出し解析することが可能となった。地震テクトニクスへの貢献のみならず、地球環境問題に関連した、地球表層の水熱輸送への関心もあり、難易度の高い課題ではあるが様々な関連研究が進められている。

さらに、2010年代に入って、熱年代学発展の新たな光が、ルミネッセンス年代測定業界からもたらされた。OSL（光励起ルミネッセンス）年代法による「超低温」領域熱年代学の誕生である

(Herman and King, 2018)。大陸地殻-大陸地殻衝突による超高速造山帯において、閉鎖温度がとても低く（約50°C以下）しかも若い年代領域に適した手法が成功を収めたことにより、地形発達を含む地殻浅部領域の解析が視野に入ってきた。これに続いて、ESR（電子スピン共鳴）法も用いることにより、より長い時間スケールの解析も可能となってきた（King et al., 2020）。加えて、モナザイトを用いたFT法も試みられてきており、熱年代学の新しいうねりとなることが期待される（Jones et al., 2023）。

引用文献

- Bernet, M. and Spiegel, C., 2004, Introduction: Detrital thermochronology. In *Detrital thermochronology: Provenance analysis, exhumation, and landscape evolution of mountain belts*, eds. Bernet, M. and Spiegel, C., pp. 1–6. Geological Society of America, Special Paper.
- Calk, L. C. and Naeser, C. W., 1973, The thermal effect of a basalt intrusion on fission tracks in quartz monzonite. *The Journal of Geology*, **81**, 189–198.
- Crowley, K. D., 1985, Thermal significance of fission-track length distributions. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements (1982)*, **10**, 311–322.
- Dodson, M. H., 1973, Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **40**, 259–274.
- Farley, K. A., 2002, (U-Th)/He dating: Techniques, calibrations, and applications. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **47**, 819–844.
- Gallagher, K., 1995, Evolving temperature histories from apatite fission-track data. *Earth and Planetary Science Letters*, **136**, 421–435.
- Green, P. F., Crowhurst, P. V., Duddy, I. R., Japsen, P., Holford, S. P., 2006, Conflicting (U-Th)/He and fission track ages in apatite: enhanced He retention, not anomalous annealing behaviour. *Earth and Planetary Science Letters*, **250**, 407–427.
- Green, P. F., Duddy, I. R., Laslett, G. M., Hegarty, K. A., Gleadow, A. W., Lovering, J. F., 1989, Thermal annealing of fission tracks in apatite 4. Quantitative modelling techniques and extension to geological timescales. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, **79**, 155–182.
- Guenther, W. R., Reiners, P. W., Ketcham, R. A., Nasdala, L., Giester, G., 2013, Helium diffusion in natural zircon: Radiation damage, anisotropy, and the interpretation of zircon (U-Th)/He thermochronology. *American Journal of Science*, **313**, 145–198.
- Hart, S. R., 1964, The petrology and isotopic-mineral age relations of a contact zone in the Front Range, Colorado. *The Journal of Geology*, **72**, 493–525.
- Hendriks, B. W. H., Redfield, T. F., 2005, Apatite fission track and (U-Th)/He data from Fennoscandia: An example of underestimation of fission track annealing in apatite. *Earth and Planetary Science Letters*, **236**, 443–458.
- Herman, F. and King, G. E., 2018, Luminescence thermochronometry: Investigating the link between mountain erosion, tectonics and climate. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, **14**, 33–38.
- House, M. A., Farley, K. A., Stockli, D., 2000, Helium chronometry of apatite and titanite using Nd-YAG laser heating. *Earth and Planetary Science Letters*, **183**, 365–368.

- Hurley P.M., 1954, The helium age method and the distribution and migration of helium in rocks. In *Nuclear Geology*, ed. Faul, H., pp. 301–329. Wiley and Sons, New York.
- King, G. E., Tsukamoto, S., Herman, F., Biswas, R. H., Sueoka, S., Tagami, T., 2020, Electron spin resonance (ESR) thermochronometry of the Hida range of the Japanese Alps: validation and future potential. *Geochronology*, **2**, 1–15.
- Jones, S., Kohn, B., Gleadow, A., Skrzypek, E., Tagami, T., 2023, Low-temperature thermochronology of Ryoke belt granitoids, SW Japan: New insights into the recent cooling history from monazite fission-track dating. *Tectonophysics*, **864**, 229998.
- Lutz, T. M. and Omar, G., 1991, An inverse method of modeling thermal histories from apatite fission-track data. *Earth and Planetary Science Letters*, **104**, 181–195.
- Malusà, M. G. and Fitzgerald, P. G., 2019, Application of Thermochronology to Geologic Problems: Bedrock and Detrital Approaches. In *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, eds. Malusà, M. and Fitzgerald, P. G., pp. 191–209. Cham: Springer International Publishing.
- Tagami, T., 2012, Thermochronological investigation of fault zones. *Tectonophysics*, **538–540**, 67–85.
- Tagami, T., 2019, Application of fission-track thermochronology to understand fault zones. In *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, eds. Malusà, M. and Fitzgerald, P. G., pp. 221–233. Cham: Springer International Publishing.
- Wagner, G.A., Reimer, G.M., Jäger, E., 1977, Cooling ages derived by apatite fission-track, mica Rb-Sr and K-Ar dating: the uplift and cooling history of the Central Alps. *Memorie degli Istituti di Geologia e Mineralogia dell'Università di Padova*, **30**, 1–27.
- Zeitler, P. K., Herczeg, A. L., McDougall, I., Honda, M., 1987, U-Th-He dating of apatite: A potential thermochronometer. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **51**, 2865–2868.
- Zeitler, P. K., Johnson, N. M., Naeser, C. W., Tahirkheli, R. A., 1982, Fission-track evidence for Quaternary uplift of the Nanga Parbat region, Pakistan. *Nature*, **298**, 255–257.

第 49 回日本フィッション・トラック研究会実施報告 「合同研究会報告」

第 49 回日本フィッション・トラック (FT) 研究会は, ESR 応用計測研究会・ルミネッセンス年代測定研究会との合同研究会として, 2024 年 12 月 21 日 (土), 22 日 (日) に京都大学 (大学院理学研究科 1 号館 大会議室) で開催されました. 世話人の田上さんはじめ院生の皆さんの協力のおかげで盛況のうちに終えることができました. 招待講演含め 31 件の講演がありました. また研究会の前日には酒蔵ツアーも企画されました. 初日には U-Pb 法・(U-Th)/He 法, ESR, ルミネッセンスの基礎と応用などが, 2 日目に U-Pb 年代やルミネッセンス・ESR 年代, K-Ar 法のなどの高精度の年代測定の応用研究がまとめられました.

印象に残った応用研究を含め以下に概要を紹介します. アパタイトの FT へのレーザーアブレーションによる熱負荷の研究では各種アブレーション条件と FT アニール領域との関連が視覚的に示され, 通例の LA 条件範囲では加熱の影響が軽微であることが紹介されました (①). また, モナザイトの適性エッチング条件との年代測定への適用は低閉鎖温度の熱史解明を期待させる内容でした (②). (U-Th)/He 法・FT 法の山地の隆起・削剥への適用については, 東北日本弧飯豊山地を例に, 標高の高い山地中央での年代若返りとその地質学的解釈について (③), 中国山地の隆起・削剥の解明においては火山クラスターによる再加熱の影響の回避が重要であること (④), 佐渡島の基盤については, 中新世以前の漸進的加熱と鮮新世以降の急冷が一部の試料に見られ, リフティングによる埋没や東西圧縮による隆起削剥に関連するといった指摘があり (⑤), いずれも(U-Th)/He 年代の高精度化と熱史解析手法の適用の重要性を感じました. ESR・ルミネッセンスについては, シリカクラスレートに関して, 高温領域でのアニール実験によるラジカル種の挙動に関する研究 (⑥), 長石類の post-IR_s, IRSL 年代の上総層群への適用 (⑦ポスター), 風送塵中の石英のストークス法による抽出に関する基礎実験 (⑧), 海底熱水鉱床中の重晶石の含有量を Ba の放射化分析から求める基礎研究 (⑨) などがあり, ルミネッセンスや ESR 年代の精度の向上に資する貴重な内容でした. 応用例については, 青森県六戸朝の火山灰土の石英の酸素空孔量の変動が大陸からの風送塵の供給量と密接に関連するといった研究 (⑩), 北海道南部の海成段丘へのルミネッセンス年代 (年代補正を行わない pIt-IR 年代) と既往年代や段丘編年との関連 (⑪), 残存ルミネッセンスに関しては, 屏風ヶ浦～白里海岸において pIRIR150/pIRIR290 信号比が沿岸方向の土砂移動に密接に関連するといった研究 (⑫), 寺泊海岸 (大河津分水～角田浜) の残存ルミネッセンス信号が沿岸方向に明瞭に減少することを利用した土砂移動速度の推定 (⑬), 能登半島地震に関連すると思われる断層ガウジへのルミネッセンスの適用 (⑭) があり, ルミネッセンス法の多様な地質現象への適用, 特に海岸段丘や沿岸域土砂移動への重点的な適用が進んでいる印象を受けまし

た。また断層活動に伴う希ガスの放出を摩擦実験から定量化し、不感地震でも K-Ar 年代を数%若くする可能性について指摘した研究もありました (15)。また特別講演では脆性破壊と熱史の解明に対しては AFTA, ZFTA, (U-Th)/He のみではなく、ESR や TL との併用が不可欠であるといった指摘がなされ (16)、田上さんによる熱年代学に関する総括講演では、1960年代の手法の発見から、造山帯への適用、堆積盆熱史への適用、FT アニール関数と熱史の逆解析、(U-Th)/He 法を含む希ガス年代学の誕生まで、時代ごとのブレークスルーをわかりやすく紹介いただきました (17)。

2日目の講演については、U-Pb, U-Th ダブル年代測定を北アルプスの第四紀立山火山の活動史の解明に適用し、高精度の U-Pb 年代 (20 万年~40 万年前) の地質学的解釈のほか併用する U-Th 年代のジルコンに由来する特性や問題点について紹介されました (18)。そのほかゴビアルタイ山脈の U-Pb 年代、アパタイト FT 年代と HeFTy による熱履歴解析から、複数の熱イベントを推定した研究例が紹介されました (19)。また手取層群に関しては、神通層群の既報の ZFT 年代に関する問題点が指摘され、特に試料の記載を入念に行う必要性を指摘する内容でした (20)。また瀬戸内火山岩類の珪長質火山岩類の活動時期については最新の U-Pb 年代 (14-15Ma) が外帯のそれと矛盾しないことが示されました (21)。また真砂に認められる比較的低温の熱水変質作用の特徴や冷却史についての報告 (22) のほか、削剥・冷却史に関しては、谷川岳の複数のプルトンに各種年代測定と熱拡散の数値モデリングを適用し、岩体の初期冷却と削剥作用とを複合的に評価しようとする最新の研究が紹介されました (23)。鉱物分離については、主に K-Ar や Ar-Ar 年代測定のための火山岩の石基フラクションの分離方法の実際、AI 画像認識を併用した自動ハンドピッキングの取り組みなどが紹介され、他の鉱物分離の効率化にもかかわる示唆に富む内容でした (24)。有孔虫軟泥試料 (炭酸塩, 方解石) のルミネッセンス特性については、Fe 含有量とシグナル低下との関連や、赤色領域における TL 法適用可能性についての報告があり、予察的な研究ではあるものの ^{14}C 年代を補完する意味から大変ユニークな取り組みと感じました (25)。その後は ESR に関する研究が続き、千葉石と同様の結晶構造を持つ合成シリカクラスレートに対して、 γ 線照射により生成するラジカル種の熱的挙動・熱安定性の検討と年代測定への適用可能性 (26)、シリカクラスレートのうち、MEP への γ 線照射で生成するラジカルの線量応答性と比較的低温の熱安定性 (27) が報告され、低温域の ESR 信号特性や熱安定性を評価する視点から意義深いと感じました。一方、柿渋と UV 照射による紙の耐水性獲得について、UV 照射により生成したラジカル種の ESR スペクトルの特徴と撥水性との関連についての興味深い発表もありました (28)。また石英中の ESR 信号 (Ti 中心信号) が加熱により増大することから、石英の ESR 年代測定の際に注意が必要であるとの指摘がありました (29)。北上山地に産する花崗岩中の石英の Al 中心信号を用いた見かけ年代と熱史解析の最新の結果も要旨に記されています (30)。そのほかガンマ線照射した天然石英中の点欠陥の熱アニール特性に関する研究がありました (31)。

全体として、複数の年代測定手法の併用による応用研究が多く、特に熱史研究において HeFTy などによるモデリングが積極的に取り入れられている印象を受けました。またルミネッセンス法では、海岸砂、沿岸域の土砂移動、段丘試料、断層岩、炭酸塩など、その適用範囲の広がりをおもて感じさせる内容でした。レーザーアブレーションによるアパタイト FT への熱影響の評価はハイブリッド年代の精度の視点から重要ですし、また U-Pb・U-Th 法を第四紀火山への適用する際の慎重なデータの取り扱いも印象に残りました。ルミネッセンスや ESR 法を含めた低閉鎖温度手法の併用の重要性のほか、鉍物分離に関わるたゆまない工夫と努力が精度の高い年代測定を支えていると実感することができました。合同研究会に参加された皆様に心から感謝申し上げます。（※上記（ ）はおおまかな講演順番です）

「フィッション・トラック研究会総会報告」

日本フィッション・トラック (FT) 研究会総会は、2024年12月21(土) 17:40～に開催され以下の内容が話し合われた(以下、敬称略)。

1. 出席会員数確認

普通会員20名の出席と委任状7名分から、普通会員(64名)の1/5以上であることから総会成立を確認した。

2. 今年度の活動報告

ニュースレター (FTNL) 第36号の原稿募集の周知が十分にできなかった点についての反省があった(会長より)。合同研究会の京都開催については国際学会などのタイトなスケジュールのなか、田上さんほか京都の皆さんのご尽力があったことについて紹介された。また Thermo2025 (金沢) の準備状況は講演プログラムとしても報告され、国内外の学会での各種宣伝・アピールの取り組みが紹介された。また会員動向については新入会員を1名迎えることができた(旭祐輔さん: 京都大)

3. 2023年度の会計報告&会計監査報告 (報告は長谷部さん、監査は後日)

2023年度会計(2023.4.1-2024.3.31)は繰越金に対して、前年度の研究会開催費用(会場費、バイト料)およびWebドメイン費の支出があり、現在の残金は559,983円との報告があった(長谷部さん)。なお今後の状況によってはThermo2025金沢において会計の一部を使用することが承認された。

4. 次年度以降の執行部体制

会長の任期終了にともない、2025年度からの新会長を現委員の福田将真さん(JAEA)に引き受けていただくことが承認された。空席となった委員の人選については、新会長の意向に沿って選任いただくことが了承された。

5. FTNLの予定

FTNL第37号の2024年末Web早期公開予定について報告があった(田村さん)。また西村先生の追悼に関する内容はFTNL第36号に追加された旨紹介された。

6. 次年度の活動計画

- ・FTNL37号の追加原稿および38号原稿の募集の確認(田村さんより)
- ・次回の合同研究会の開催地についてはESRやルミネッセンスの皆さんの意見を優先して進めることを確認した。懇親会では東京経済大学、電中研、島根などの案が個別に出されたが、その後、岡山理科大学での開催の可能性も含めて検討することになった。

総会出席者は20名で、以下の皆様から委任状をいただきました(賛助会員を除く)
白杵昌子・安間 了・林 宏樹・三浦知督・中嶋 徹・檀原有吾・鴈澤好博

フィッシュン・トラックニュースレター

第38号 冊子版 (2025)

発行日 2025年12月31日

編集 長田充弘 (nagata.mitsuhiro@nihon-u.ac.jp)

〒156-8550 東京都世田谷区桜上水3-25-40

日本大学 文理学部 地球科学科

発行 日本フィッシュン・トラック研究会

<http://ftrgj.org/index.html>

研究会問い合わせ先

福田将真 (fukuda.shoma@jaea.go.jp)

〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺959-31

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構東濃地科学センター
