

フィッション・トラック ニュースレター

第35号 (2022年12月)
日本フィッション・トラック研究会

第46回フィッション・トラック研究会 (2022年2月21日 - 22日 オンラインセッション)

低温熱年代学に基づくスラブ起源流体活動に伴う熱異常検出の試み 末岡 茂・岩野英樹・檀原 徹・岡本 晃・田上高広 -----	1
第四紀滝谷花崗閃緑岩：傾動隆起した岩体それとも再生プルトン？ 伊藤久敏 -----	5
ジルコン(U-Th)/He法の年代標準試料の探求 (続報)：複数のジルコン試料における年代学的検討 福田将真・Barry P. Kohn・末岡 茂・檀原 徹・岩野英樹・田上高広 -----	7
(U-Th)/He法のための高温加圧酸分解によるジルコンの完全溶解の試み 福田将真・鏡味沙耶 -----	11
照来層群歌長流紋岩から得られたジルコンU-Pb年代 長田充弘・福田将真・末岡 茂・中嶋 徹・梶田侑弥・南 沙樹・岡本 晃・田上高広 -----	15
北上山地における熱年代学データとその解釈 梶田侑弥・末岡 茂・福田将真・田上高広 -----	19
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 南 沙樹・末岡 茂・福田将真・長田充弘・Barry P. Kohn・横山立憲・ 鏡味沙耶・梶田侑弥・田上高広 -----	22
210-lead dating of lacustrine sediment: Tsagaan Lake in Valley of the Gobi Lakes in Mongolia Shuukhaaz Ganbat, Noriko Hasebe, Davaadorj Davaasuren, Uyangaa Udaanjargal and Yuma Shibuya -----	27
Am線源, Cf線源を利用したアルファリコイルトラックの形成実験 中島大輝・横山明彦・山田記大・長谷部徳子・飯沼勇人・高宮幸一 -----	30
バデリアイトのフィッション・トラック年代測定に向けて：エッチング実験の結果とその考察 中嶋 徹・福田 将真・長田 充弘・檀原 徹・岩野 英樹・末岡 茂 -----	34
有孔虫の熱ルミネッセンス測定 品田遥可・佐川拓也・濱田麻希・長谷部徳子 -----	37
学 会 記 事 -----	41

FISSION TRACK NEWS LETTER**No. 35 (DECEMBER 2022)****FISSION TRACK RESEARCH GROUP IN JAPAN****Extended abstracts of 46th Meeting of the Fission Track Research Group in Japan**

(21-22 February, 2022 : Online Session)

Attempts to detect thermal anomalies associated with slab-derived fluid activities based on low-temperature thermochronology Shigeru Sueoka, Hideki Iwano, Tohru Danhara, Akira Okamoto and Takahiro Tagami -----	1
The Quaternary Takidani Granodiorite : a tilted and uplifted block or a resurgent pluton? Hisatoshi Ito -----	5
Evaluation of potential age standards for zircon (U-Th)/He thermochronometry: results from further chronometric investigations Shoma Fukuda, Barry P. Kohn, Shigeru Sueoka, Tohru Danhara, Hideki Iwano and Takahiro Tagami -----	7
An experiment of complete dissolution of zircon crystals by high-temperature and pressure acid digestion for the (U-Th)/He method Shoma Fukuda and Saya Kagami -----	11
U–Pb zircon dates from the Utaosa Rhyolite of the Teragi Group Mitsuhiro Nagata, Shoma Fukuda, Shigeru Sueoka, Toru Nakajima, Yuya Kajita, Saki Minami, Akira Okamoto and Takahiro Tagami -----	15
Thermochronological data in the Kitakami Mountains and their interpretation Yuya Kajita, Shigeru Sueoka, Shoma Fukuda and Takahiro Tagami -----	19
Estimation of thermal/denudation histories in the Tanigawa-dake area based on thermochronological methods Saki Minami, Shigeru Sueoka, Shoma Fukuda, Mitsuhiro Nagata, Barry P. Kohn, Tatsunori Yokoyama, Saya Kagami, Yuya Kajita and Takahiro Tagami -----	22
210-lead dating of lacustrine sediment: Tsagaan Lake in Valley of the Gobi Lakes in Mongolia Shuukhaaz Ganbat, Noriko Hasebe, Davaadorj Davaasuren, Uyangaa Udaanjargal and Yuma Shibuya -----	27
Experiments on the formation of alpha recoil tracks using Am and Cf radiation sources Taiki Nakashima, Akihiko Yokoyama, Norihiro Yamada, Noriko Hasebe, Yuto Iinuma and Koichi Takamiya -----	30
Toward fission-track dating of baddeleyite: first reports and discussions on etching experiments Toru Nakajima, Shoma Fukuda, Mitsuhiro Nagata, Tohru Daihara, Hideki Iwano and Shigeru Sueoka -----	34
Thermoluminescence measurement emitted from foraminifera Haruka Shinada, Takuya Sagawa, Maki Hamada and Noriko Hasebe -----	37
NEWS -----	41

低温熱年代学に基づくスラブ起源流体活動に伴う熱異常検出の試み

末岡 茂*・岩野英樹**・檀原 徹**・岡本 晃***・田上高広***

Attempts to detect thermal anomalies associated with slab-derived fluid activities
based on low-temperature thermochronology

Shigeru Sueoka*, Hideki Iwano**, Tohru Danhara**,
Akira Okamoto*** and Takahiro Tagami***

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

** (株)京都フィッション・トラック, Kyoto Fission-Track Co., Ltd.

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

はじめに

沈み込み帯では、スラブからの脱水によりメルトが生成され火山弧が形成されることはよく知られている。一方で、西南日本前弧域などでは、メルトの生成を伴わないスラブ起源流体の活動が報告されている（風早ほか，2014など）。このような流体活動は、前弧域における熱輸送・物質移動に関わるのみならず、内陸の地震活動との関連が指摘されている。また、地熱資源の開発や地下重要施設の安全性評価などの社会的な側面からも、その性質の理解が望まれている。

本稿では、過去のスラブ起源流体活動の痕跡と考えられる熱水変質帯を対象に、低温領域の熱年代学に基づいて、流体活動の熱的特徴（到達温度、継続期間など）の検討を試みた事例を紹介する。事例地域は、スラブ起源流体の湧出地域として知られる紀伊半島本宮地域（例えば、Umeda et al., 2007; Yamaguchi et al., 2009; Morikawa et al., 2016）と有馬地域（例えば、西村, 2011; Kusuda et al., 2014）の2つである。

本宮地域の事例

本宮地域では、平治川の3地点の熱水脈露頭を対象とした（本事例の詳細は、Sueoka et al., 2020のpreprintを参照）。いずれの露頭でも、母岩である四万十帯音無川層群の砂岩中

に、幅50 cm～1 m程度の熱水脈（石英脈）が確認されており、熱水脈およびその近傍の母岩を採取した。

熱水脈試料については、熱水活動の温度を推定するために、流体包有物解析を適用した。初生包有物を対象とした均質化温度測定の結果、3地点中2地点の熱水脈から、熱水温度をそれぞれ約150℃と200℃と推定することができた。

母岩試料については、熱年代解析により、熱水活動の時期、熱影響の空間的範囲、継続時間などの推定を試みた。すなわち、熱水脈-母岩の境界からの距離に応じて、< 5 cm～3 mの範囲で複数の試料を採取し、複数の熱年代手法を適用した。その結果、77.3～66.9 MaのジルコンU-Pb年代、34.1～24.0 MaのジルコンFT年代、23.6～8.7 Maのジルコン(U-Th)/He粒子年代、12.0～9.0 MaのアパタイトFT年代が得られた。しかし、いずれの熱年代計においても、熱水脈からの距離に応じた冷却年代の変化、すなわち熱水活動による熱異常は検出できなかった。原因としては、活動時期が古かったためにそれ以降の削剥等により冷却年代が上書きされた可能性と、活動継続期間が短すぎた（150℃なら約10年以下、200℃なら数ヶ月以下）可能性が考えられる。

有馬地域の事例

有馬地域では、白水峡付近の六甲断層露頭 (Mitchell et al., 2011) を対象とした。本宮地域のような大規模な熱水脈は確認できなかったため、熱水の移行経路として期待される断層からの距離に応じて、熱年代解析用の基盤岩 (風化した六甲花崗岩) を採取した。いずれの試料もアパタイトの含有に乏しかったため、ジルコンFT長による検討を行った。断層から0~5 cm, 5~10 cm, 10~15 cm, >500 cmの試料を測定したところ、いずれも平均長約11 μm の単峰性のFT長分布を示した。すなわち、再加熱の兆候は認められず、熱水活動に伴う熱異常は検出できないという結果となった。

数値モデルとの比較・検討

以上の結果を整理・検討するため、数値モデルとの比較を行った。すなわち、温度一定の熱水活動がある期間にわたって継続した場合に、周囲の母岩から得られる冷却年代の空間分布をモデル計算した (図1)。母岩への熱影響は熱伝導のみを考慮し、一次元熱伝導方程式で各地点の温度-時間履歴を計算した (母岩中への熱水の浸透は考慮していないため、最小限の熱影響を評価していることになる)。得られた温度-時間履歴を、HeFTy ver. 1.9.3 (Ketcham, 2005) のフォワード機能により、アパタイトFT年代、ジルコン(U-Th)/He年代、ジルコンFT年代にそれぞれ変換した。

計算の結果を図1に示す。熱水温度が150°Cの場合、いずれの熱年代計でも、誤差範囲を超えた年代の若返りはみられない。少なくとも1000年以下の加熱期間については、これらの熱年代計では熱異常の検出は困難と考えられる。一方、熱水温度が200~300°Cの場合、1000年以下の加熱期間でも、アパタイトFT年代とジルコン(U-Th)/He年代の若返りが期待できる。すなわち、熱水活動の時期、熱影響範囲、継続期間などに関する情報が取得できる可能性がある。なお、いずれのケース、いずれの熱年代計でも、熱水脈から0~30 cmの範囲で

は、一般的な誤差範囲を超えた有意な年代差はみられなかった。したがって、断層帯の年代測定のようなmm~cm単位の精密なサンプリング戦略 (d'Alessio et al., 2003; Murakami & Tagami, 2005) は、熱水活動の場合は不要であると期待できる。

謝辞

本報告は経済産業省資源エネルギー庁委託事業「平成30~令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 (地質環境長期安定性評価技術高度化開発) 」 (JPJ007597) の成果の一部である。流体包有物解析は地熱エンジニアリング株式会社に、ジルコン(U-Th)/He年代測定はメルボルン大学のBarry Kohn教授にそれぞれ依頼した。

引用文献

- d'Alessio M.A. et al. (2003) No frictional heat along the San Gabriel fault, California: Evidence from fission-track thermochronology. *Geology*, 31, 541-544.
- Guenther W.R. et al. (2013) Helium diffusion in natural zircon: radiation damage, anisotropy, and the interpretation of zircon (U-Th)/He thermochronology. *Amer. Jour. Sci.*, 313, 145-198.
- 風早康平ほか (2014) 西南日本におけるスラブ起源深部流体の分布と特徴. *日本水文科学会誌*, 44, 3-16.
- Ketcham R.A. (2005) Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Rev. Min. Geochem.*, 58, 275-314.
- Ketcham R.A. et al. (2007) Improved modeling of fission-track annealing in apatite. *Amer. Min.*, 92, 799-810.
- Kusuda C. et al. (2014) Arima hot spring waters as a deep-seated brine from

- subducting slab. *Earth, Planets Space*, 66:119.
- Mitchell T.M. et al. (2011) Pulverized fault rocks and damage asymmetry along the Arima-Takatsuki Tectonic Line, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 308, 284-297.
- Morikawa, N. et al. (2016) Widespread distribution of ascending fluids transporting mantle helium in the fore-arc region and their upwelling processes: Noble gas and major element composition of deep groundwater in the Kii Peninsula, southwest Japan. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 182, 173-196.
- Murakami M. and Tagami T. (2004) Dating pseudotachylyte of the Nojima fault using the zircon fission-track method. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12604, doi:10.1029/2004GL020211.
- 西村 進 (2011) 近畿地方の高温泉とその地質構造. *温泉科学*, 60, 481-491.
- Sueoka S. et al. (2020) Thermal characteristics of fossil fluids from the Philippine Sea slab: Insights from fluid inclusions and thermochronology. *ESSOAr*, <https://doi.org/10.1002/essoar.10504421.1>.
- Umeda K. et al. (2006) Aqueous fluids derived from a subducting slab: Observed high ^3He emanation and conductive anomaly in a non-volcanic region, Kii Peninsula southwest Japan. *Jour. Volc. Geotherm. Res.*, 149, 47- 61.
- Yamada R. et al. (2007) Statistical modelling of annealing kinetics of fission tracks in zircon; Reassessment of laboratory experiments. *Chem. Geol.*, 239, 75-91.
- Yamaguchi S. et al. (2009) Modification of the Network-MT method and its first application in imaging the deep conductivity structure beneath the Kii Peninsula, southwestern Japan. *Earth Planets Space*, 61, 957-971.

熱影響 (熱拡散のみを仮定)

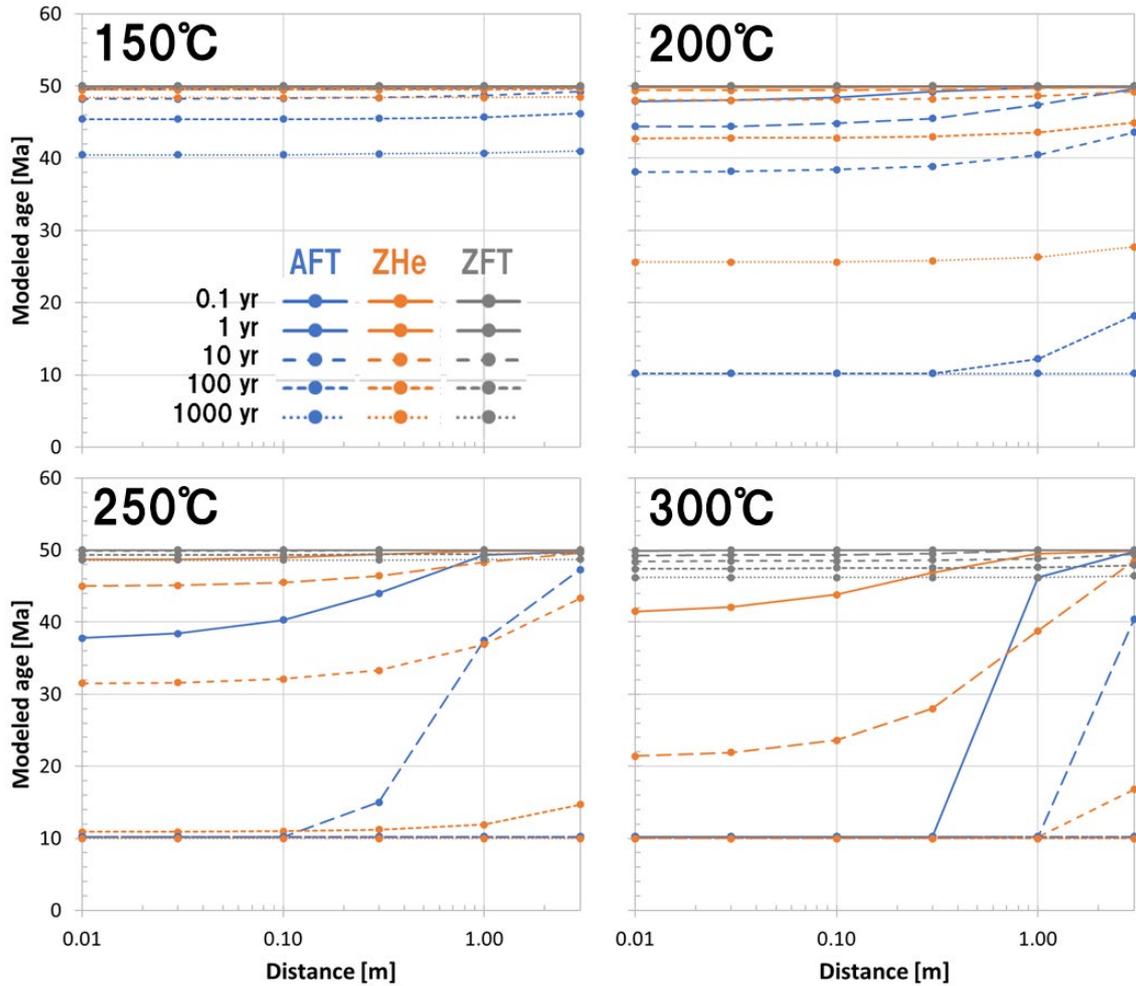


図1. 数値モデルの概念図と結果. 母岩の非加熱時の年代を50 Ma, 熱水活動の開始を10 Maとした時の熱水温度150°C, 200°C, 250°C, 350°Cの計算結果を示す. 初期温度 (環境温度) は20°C, 熱拡散率は $3.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ とした. カイネティクスは, アパタイトFT法はKetcham et al. (2007), ジルコン(U-Th)/He法はGuenther et al. (2013), ジルコンFT法はYamada et al. (2007) の Fanning Arrheniusをそれぞれ用いた.

第四紀滝谷花崗閃緑岩：傾動隆起した岩体それとも再生プルトン？

伊藤久敏*

The Quaternary Takidani Granodiorite :
a tilted and uplifted block or a resurgent pluton?

Hisatoshi Ito*

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

はじめに

北アルプスには、露出面積の広い (> 20 km²)、2つの第四紀プルトン (黒部川花崗岩体、滝谷花崗閃緑岩体) が存在する。これらのプルトンは、超巨大噴火 (それぞれ、爺ヶ岳火山岩類、穂高安山岩を噴出した噴火) 後に生成したプルトンであり、黒部川花崗岩体については、再生プルトンとして、マグマの浮力により、激しい隆起・削剝を経て、地表に露出するに至ったと考えられることを指摘した (伊藤, 2021; Ito et al., 2021)。今回、滝谷花崗閃緑岩体についても再生プルトンにより隆起したと考えられることを以下に述べる。

穂高・滝谷火山深成岩体のジルコンU-Pb年代

今回、滝谷花崗閃緑岩体から9地点、穂高安山岩体から4地点で試料採取を行い、ジルコンのU-Pb年代測定を行った。それぞれの地点で得られた粒子年代をまとめ、確率密度曲線とヒストグラムを作成したところ、滝谷花崗閃緑岩と穂高安山岩はそれぞれ、1.4 Maと1.9 Maにピークを持つ年代分布を示した (Fig. 1)。大略的には、穂高安山岩が1.9 Ma頃に噴出し、50万年後の1.4 Ma頃に、再注入したマグマが固結し、滝谷花崗閃緑岩になったと考えられる。1.55 Maに爺ヶ岳火山岩類が噴出し、1.0 Ma頃に生成した黒部川花崗岩 (Ito et al., 2021) とは、噴火から花崗岩の生成に至る期間がほぼ同じ (50~60万年間) であり、滝谷花崗閃緑岩分布域も黒部川花崗岩分布域と同様

のメカニズム、すなわち再生プルトンおよびその生成に関与したマグマの浮力による上昇で現在の地形形成に至ったことが推測される。原山ほか (2003) は槍穂高連峰の東側への約15~20°の傾動の原因を東西圧縮力に求めたが、再生プルトンによる局所的な隆起がこの傾動を起こしたとしても説明可能と考えられる。

滝谷花崗閃緑岩体西部の性状

傾動隆起の根拠の一つとして、原山ほか (2003) は、滝谷花崗閃緑岩体中のマイロナイトの存在を指摘している。その位置は原山ほか (2003) には示されていないが、マイロナイトが存在するとすれば、黒部川花崗岩と同様に岩体の西縁であると思われる。Fig. 2に今回採取した試料のうち、滝谷花崗閃緑岩分布域西縁から採取した試料 (試料採取位置の緯度・経度: 36度17分59.89秒; 137度36分50.96秒) の薄片写真を示す。同写真より、石英には、マイロナイトに特徴的な流動変形が認められず、他の採取地点の薄片でもマイロナイトが認められないことから、滝谷花崗閃緑岩体中には地下深部から断層運動により地表にもたらされた岩石 (=マイロナイト) は存在しないと考えられる。

文献

原山 智, 大藪圭一郎, 深山裕永, 足立英彦, 宿輪隆太, 2003. 飛驒山脈東半部における前期更新世後半からの傾動・隆起運動. 第四紀研究, 42, 127-140.

伊藤久敏, 2021. 第四紀黒部川花崗岩：傾動隆起した岩体それとも再生プルトン？
 フィッション・トラックニュースレター,
 34, 1-3.
 Ito, H., Adachi, Y., Cambeses, A., Bea, F.,
 Fukuyama, M., Fukuma, K., Yamada, R.,

Kubo, T., Takehara, M. and Horie, K.,
 2021. The Quaternary Kurobegawa
 Granite: an example of a deeply
 dissected resurgent pluton. *Sci. Rep.*,
 11, 22059.

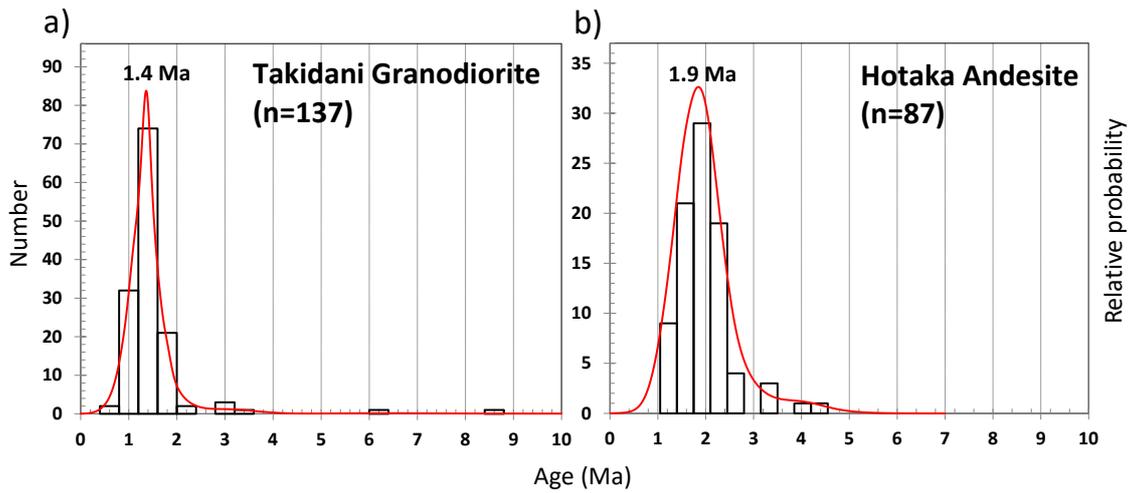


Fig. 1. ^{238}U - ^{206}Pb age distributions (histogram, probability density plot) for zircon younger than 10 Ma for (a) the Takidani Granodiorite and (b) the Hotaka Andesite. n = number of grains plotted.

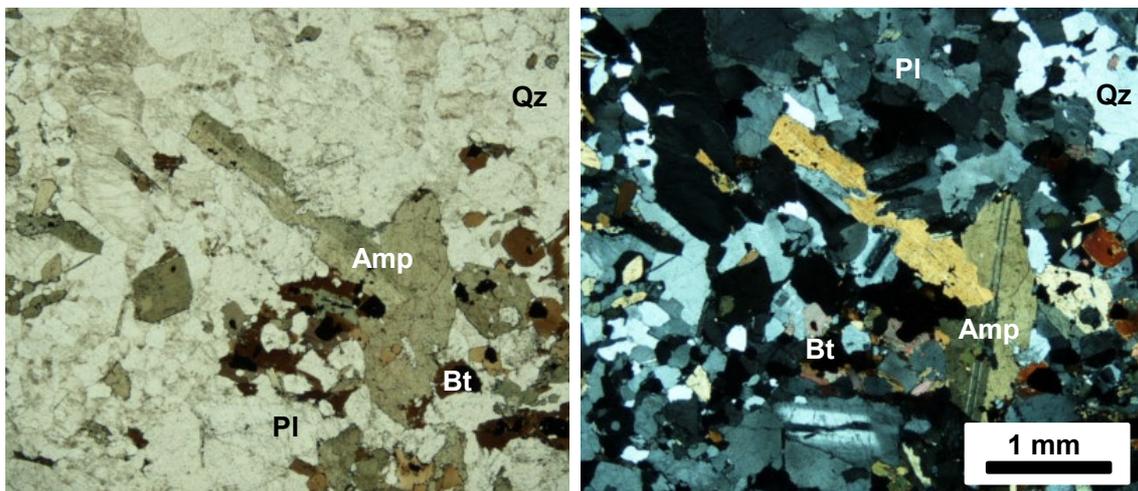


Fig. 2. Photomicrographs (taken in plane- and cross-polarized light) of the Takidani Granodiorite that show no signs of shearing. Qz: quartz, Pl: plagioclase, Amp: amphibole, Bt: biotite.

ジルコン(U-Th)/He法の年代標準試料の探求(続報) :
複数のジルコン試料における年代学的検討

福田将真*・Barry P. Kohn**・末岡 茂*・
檀原 徹***・岩野英樹***・田上高広****

Evaluation of potential age standards for zircon (U-Th)/He thermochronometry:
results from further chronometric investigations

Shoma Fukuda*, Barry P. Kohn**, Shigeru Sueoka*,
Tohru Danhara***, Hideki Iwano*** 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, University of Melbourne

*** (株)京都フィッション・トラック, Kyoto Fission-Track Co., Ltd.

**** 京都大学, Kyoto University

はじめに

熱年代学的手法のうち、(U-Th)/He法(以降、He法)は閉鎖温度が低温(<200°C)の部類に分類され、地殻浅部から地球表層における熱イベントの検出に用いられる(例えば、Ault et al., 2019)。具体的には、山地の隆起・削剥や、堆積盆地の進化史、断層の活動性などの推定に応用されており、高レベル放射性廃棄物の地層処分においても、地質環境の安定性を評価する手法・技術としての活用が期待される。

He法の課題のひとつに年代標準試料の確立がある。フィッション・トラック法(FT法)とHe法では、対象鉱物が共通であることも相まって、現状ではFT法の年代標準試料を流用している。ただし、He法には、単粒子年代のばらつきに寄与する要因が多く(Flowers et al., 2022a,b)、FT法の標準試料であってもHe法には適さない場合がある。例えば、He法に特有の誤差要因として、結晶の粒径・形状(Farley, 2000)、鉱物中の親核種濃度の不均質や包有物(Farley et al., 2011; Danišik et al., 2017)、放射線損傷(Shuster et al., 2006; Guenther et al., 2013)などが知られている。そのため、ジルコンHe(ZHe)年代

の標準試料として慣用的に使用されているFish Canyon Tuffジルコンにおいても、親核種濃度の不均質が主因となって、年代がばらつく結果が報告されている(Dobson et al., 2008)。一方近年では、He法の標準試料候補となり得るアパタイト(Wu et al., 2019; 2021)やジルコン(Tian et al., 2017; Li et al., 2017; Kirkland et al., 2020; Yu et al., 2020)が報告されつつある。しかしながら、これらの鉱物試料はcmスケールの巨晶であり、測定時には粒子を粉碎した破片を用いるため、一般的な粒径の自形の未知試料とは完全には分析条件が一致しない。したがって、未知試料と同様の分析条件で運用できる年代標準試料の確立が急がれる。

筆者らは2021年度より、ZHe法の年代標準試料の確立を目指し、日本および世界で知られるジルコン試料の選定と予備実験を実施してきた。仁左平層中の流紋岩のジルコンや照来層群中の歌長流紋岩のジルコン、およびジルコンフィッション・トラック法(以下、ZFT法)の年代標準試料であるBuluk Tuffジルコン(Hurford & Watkins, 1987)について、各試料30粒子以上を用いてZHe年代分析を行い、加重平均年代や単粒子年代のばらつきなどを基

に検討を行った(福田ほか, 2021; Fukuda et al., 2021)。その結果, 歌長流紋岩のジルコンであるTRG04-21では, 年代のばらつきも小さく, 他の熱年代法の年代値とも整合的であることから, 年代標準試料の候補として有力であることが明らかになってきた。一方で, 同じ歌長流紋岩から採取したTRG07-21や, Buluk Tuffでは, 加重平均年代値は他の手法と誤差範囲で整合的である一方, 単粒子年代のばらつきが大きいといった結果が得られた。

ZHe年代分析

本報告では, 新たな年代標準試料の候補として, ZFT法の年代標準試料であるMt. Dromedary (Green, 1985) やU-Pb法の標準試料であるOD-3 (Iwano et al., 2013), 国内の地質試料である鷲走ヶ岳月長石流紋岩 (WSF1) および濃飛流紋岩 (Site-43) の計4試料のジルコン (図1) を対象にZHe年代分析を行い, 単粒子年代のばらつきの評価・比較を試みた。一連の分析は, メルボルン大学で実施した。

結果・考察

ZHe年代測定の結果として, OD-3の加重平均年代は 29.8 ± 2.4 Ma (以降, 誤差範囲は 2σ 表示), Mt. Dromedaryは 95.3 ± 2.4 Ma, WSF1で 17.8 ± 1.1 Ma, Site-43で 50.6 ± 2.9 Maが得られた。Mt. Dromedaryについては既往年代データとほぼ整合的な一方で, 残りの3試料は有意に若く, 特にSite-43は二次的な加熱を被った可能性が示唆される(表1)。先行研究の結果を併せると, 現状得られている8試料中(表1)では, 歌長流紋岩 (TRG04-21) のZHe単粒子年代はばらつきが最も小さく, 複数手法の年代値が整合的かつ親核種濃度も比較的均質で粒径も適当であることから, 適性が高いと結論付けた。加えて, 長田ほか(2022)による歌長流紋岩のジルコンU-Pb年代測定により, 既報のZHe年代 (Tagami et al., 2003) だけでなく, 黒雲母のK-Ar年代

やZFT年代(宇都ほか, 1994; Uto et al., 1997)など, 他の熱年代法の既往データとも誤差範囲で一致しており, 年代標準試料に適した急冷試料であることが示唆された。したがって, He法だけでなく他の年代計の標準試料としての潜在性も認められつつある。今後はZHe年代のばらつきの要因を詳細に検討するため, ジルコン粒子内の親核種濃度の分布や包有物の有無などの把握を目的とした化学分析や鉱物組織の観察などを実施予定である。

謝辞

本研究は, 「平成31年度放射性廃棄物共通技術調査等事業(放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務)」の成果の一部である。

引用文献

- Ault, A.K. et al., (2019): Innovations in (U-Th)/He, Fission Track, and Trapped Charge Thermochronometry with Applications to Earthquakes, Weathering, Surface-Mantle Connections, and the Growth and Decay of Mountains. *Tectonics* 38, 3705–3739.
- Danišik, M. et al., (2017): Seeing is believing: Visualization of He distribution in zircon and implications for thermal history reconstruction on single crystals. *Sci. Adv.* 3, 1–9.
- Dobson, K.J. et al., (2008): U and Th zonation in Fish Canyon Tuff zircons: Implications for a zircon (U-Th)/He standard. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 4745–4755.
- Farley, K.A., (2000): Helium diffusion from apatite: General behavior as illustrated by Durango fluorapatite. *J. Geophys. Res.* 105, 2903–2914.
- Farley, K.A. et al., (2011): U and Th zonation in apatite observed by laser

- ablation ICPMS, and implications for the (U-Th)/He system. *Geochem. Cosmochim. Acta*, 75, 4515-4530.
- Flowers, R.M., et al., (2022a): (U-Th)/He chronology: Part 1. Data, uncertainty, and reporting. *Geol. Soc. Am. Bull. Spec. Vol. Reporting*, 1-33.
- Flowers, R.M. et al., (2022b): (U-Th)/He chronology: Part 2. Considerations for evaluating, integrating, and interpreting conventional individual aliquot data. *Geol. Soc. Am. Bull. Spec. Vol. Reporting*, 1-25.
- 福田将真ほか, (2021): ジルコン(U-Th)/He法の年代標準試料の探求: 仁左平デイサイトにおける年代学的検討, *FTNL* 34, 9-13.
- Fukuda S., et al., (2021): Evaluation of zircon from the Pliocene Utaosa rhyolite Japan as reference material for (U-Th)/He thermochronometry, *Thermo2021/2022 abst. Santa Fe + online (hybrid)*.
- Green, P.F., (1985): Comparison of Zeta Calibration Baselines for Fission-Track Dating of Apatite, Zircon and Sphene. *Chem. Geol. Isot. Geosci. Sect.* 58, 1-22.
- Guenther, W.R. et al., (2013): Helium diffusion in natural zircon: radiation damage, anisotropy, and the interpretation of zircon (U-Th)/He thermochronology. *Am. J. Sci.* 313, 145-198.
- Hurford, A.J., Watkins, R.T., (1987): Fission-track age of the tuffs of the Buluk member, Bakate formation, Northern Kenya: A suitable fission-track age standard. *Chem. Geol. Isot. Geosci. Sect.* 66, 209-216.
- Iwano, H. et al., (2013): An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as a secondary U-Pb dating standard. *Isl. Arc* 22, 382-394.
- Kirkland, C.L. et al., (2020): Dating young zircon: A case study from Southeast Asian megacrysts. *Geochem. Cosmochim. Acta* 274, 1-19.
- Li, Y. et al., (2017): A Potential (U-Th)/He Zircon Reference Material from Penglai Zircon Megacrysts. *Geostand. Geoanalytical Res.* 41, 359-365.
- 長田充弘ほか, (2022): 照来層群歌長流紋岩から得られたジルコンU-Pb年代, *FTNL* 35, 15-18
- Shuster, D. et al., (2006): The influence of natural radiation damage on helium diffusion kinetics in apatite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 249, 148-161.
- Tagami, T. et al., (2003): (U-Th)/He geochronology of single zircon grains of known Tertiary eruption age. *Earth Planet. Sci. Lett.* 207, 57-67.
- Tian, Y. et al., (2017): LGC-1: A zircon reference material for in-situ (U-Th)/He dating. *Chem. Geol.* 454, 80-92.
- 宇都浩三ほか, (1994): 山陰地方東部, 鮮新統照来層群火山岩類のK-Arおよびフィッシュオントラック年代, *地質学雑誌*, 100, 787-798.
- Uto K., et al., (1997): Laser-heating $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating system of the Geological Survey of Japan: System Outline and Preliminary Results, *Bull. Geol. Surv. Japan*, 48(1), 23-46.
- Wu, L. et al., (2019): MK-1 Apatite: A New Potential Reference Material for (U-Th)/He Dating. *Geostand. Geoanalytical Res.* 43, 301-315.
- Wu, L. et al., (2021): Reappraisal of the applicability of MK-1 apatite as a reference standard for (U-Th)/He geochronology. *Chem. Geol.* 575, 1-6.

Yu, S. et al., (2020): Further Evaluation of Penglai Zircon Megacrysts as a

Reference Material for (U-Th)/He Dating. Geostand. Geoanalytical Res. 44, 763–783.

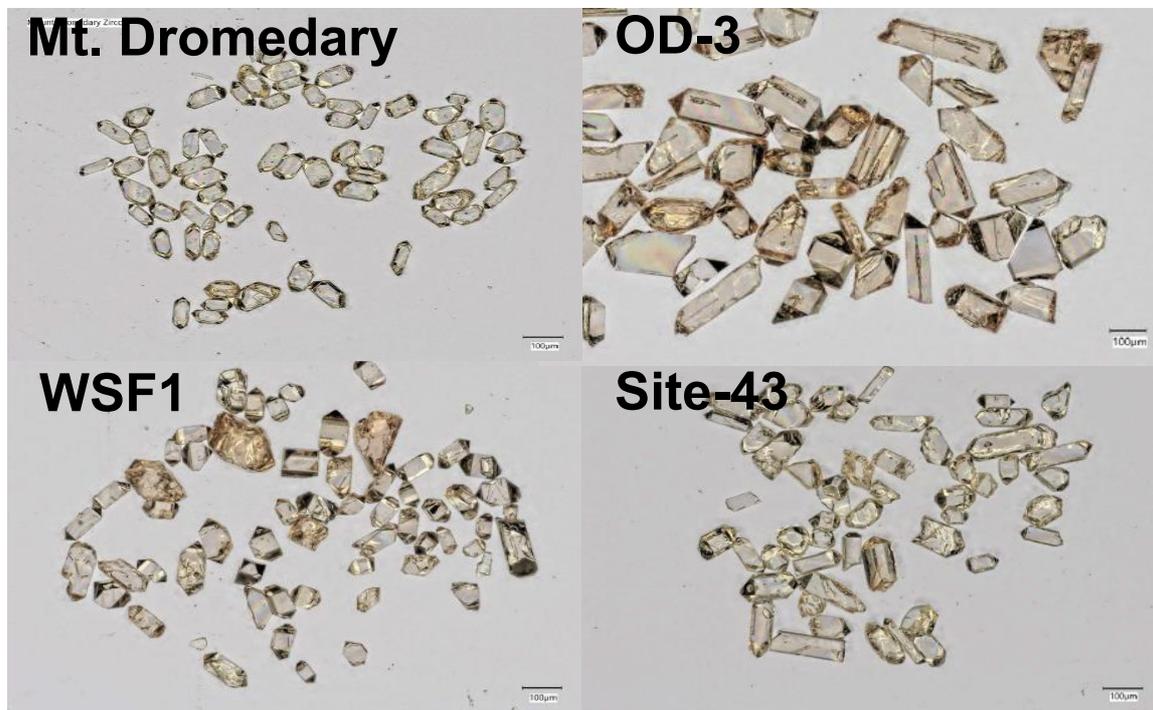


図1. 本研究でZHe年代分析を実施した4つのジルコン試料。右下のスケールバーは100 μm。

表 1. 筆者らで実施してきたZHe年代分析の一覧。

サンプル	ZHe 年代 ±95%CI (Ma)	MSWD	参照年代値 (Ma)	年代値の評価とその要因など
NST19	21.0 ± 0.30	10.9	22~21 Ma (ZFT)	バラつきが大きい→親核種のゾーニング、異質粒子？
TRG04-21	2.42 ± 0.13	5.47	2.61 ± 0.36 (ZHe)	現状では最も理想的
TRG07-21	2.77 ± 0.20	13.6	2.61 ± 0.36 (ZHe)	バラつきが大きい→包有物？
Buluk tuff	17.7 ± 1.74	20.2	16.1 ± 1.6 (ZHe)	バラつきが大きい→結晶が理想的でない (表面が凹凸, 平べったい粒形)
Mt. Dromedary	95.3 ± 2.37	1.24	99.2 ± 3.6 (ZHe)	誤差範囲では整合的だが少し若い→ 結晶が細い (半径 20~40 μm 以下)
OD-3	29.8 ± 2.44	12.1	32.6 ± 0.6 (ZFT)	有意に若く, ばらつく→徐冷, 錘が無い結 晶形, 粒径が大きい, ゾーニング？
WSF1	17.8 ± 1.05	5.38	21.6 ± 1.6 (ZFT)	有意に若い→熱水の影響？ (ZFT 年代より Rb-Sr 年代の方が若い)
Site-43	50.6 ± 2.93	5.67	72~70 Ma (U-Pb)	有意に若い→貫入岩の二次加熱？ (ZFT 年代なども若返る)

CI: Confidence Intervals; MSWD: Mean Square Weighted Deviation

(U-Th)/He法のための高温加圧酸分解による ジルコンの完全溶解の試み

福田将眞*・鏡味沙耶*

An experiment of complete dissolution of zircon crystals by high-temperature
and pressure acid digestion for the (U-Th)/He method

Shoma Fukuda* and Saya Kagami*

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

はじめに

ジルコン ($ZrSiO_4$) は堆積岩や火成岩、変成岩に至るまで多様な岩石から産出するウラン含有鉱物であり、複数の年代測定法の対象鉱物として利用される。近年では、閉鎖温度が低い部類 ($< 300^\circ C$) の熱年代法として、フィッション・トラック法や(U-Th)/He法 (以降、He法) にも利用されており、世界中の幅広い地域において地球科学的現象の推定に用いられる (例えば, Ault et al., 2019)。多様な地質体から産する背景として、ジルコンは物理的・化学的に強固な性質が挙げられる。これは、天然環境下において、風化や変質による影響を受けにくいといった保存性に優れた性質である。一方、このような化学的な耐性を持つジルコンの実験室内での溶解は容易でない。

東濃地科学センターにおけるHe年代分析は、粒子の選別からAlphachron (ASI社製) を用いたHeガスの測定まではルーティン化されている (菅野ほか, 2021)。ただし、U・Th濃度の定量のために、先述のような性質を持つジルコンの溶液化は容易でない。従来は、高周波加熱加圧分解装置を用いた溶解法と、アルカリ溶剤のメタホウ酸リチウム ($LiBO_2$) を使用してガラス化したのちに熔融する2つの手法が試みられた (山田・國分, 2012)。前者では、古いジルコンについては溶解に成功したものの、放射線損傷を回復させたアニーリング済みのジルコンの溶解には失敗している。後者については、アルカリ融剤によ

るICP-MSの汚染が懸念されたが、Li濃度はブランクレベルであり、高い再現性と安定した回収率を実現している。ただし、分解作業を跨いだでの回収率や、U・Th濃度のブランクレベルは未検証であるため、実用段階に至っているとは言い難い。世界的には、高温高圧酸分解容器を用いた湿式分析が採用されている (例えば, Evans et al., 2005; Gautheron et al., 2021) が、導入コストなどの課題により、東濃地科学センターにおいてはこれまで検討例がなかった。近年、東濃地科学センターにParr社製の高温加圧酸分解容器 (Model 4748) (図1) が導入されたため、東濃地科学センターにおける分析環境下での知見の蓄積を試みる。

試料・手法

本研究では、高温加圧酸分解容器を用いたフッ酸によるジルコンの完全分解を試みた。試料はカンボジア産の巨晶ジルコン (粒径1~数 cm) を使用した。分解の前に、放射線損傷を回復させるため、白金坩堝に入れて電気炉で $900^\circ C$ ・48時間の条件で加熱してアニーリングさせ、ステンレス乳鉢を用いて粉碎して粒子片を得た。そのうち、最大の長径が(a) 700~800 μm 程度、(b) 300~400 μm 、(c) 200~300 μm 程度の3種類のグループに分け、それぞれ2粒子片ずつ精選した (図2)。その後、各粒子片を1つずつ29 Mのフッ酸に浸漬させ、酸分解容器に封入して $220^\circ C$ で70時間加熱して溶液化した。その後、フッ酸溶媒の試料溶液を

ホットプレート上で乾固したのちに塩酸に溶解させ、Zrの沈殿を防ぐためにすぐにICP-MS (Agilent 7700x) に導入して測定を行った。完全に分解されたことを確認するため、XSTC-8標準溶液 (SPEX製) を用いた検量線法に基づき、Zr濃度を測定した。また、実験過程におけるブランク測定も同様に行った。

結果・考察

ジルコンの湿式分析の前に、Zr濃度の測定のため、XSTC-8標準溶液をホットプレート上で蒸発乾固させて、0.5MのHCl溶媒に調製した。この時、8種類の希釈率 (50 ppb, 10 ppb, 5 ppb, 1 ppb, 0.5 ppb, 0.1 ppb, 0.01 ppb, blank) となるように調整し、希釈溶液を基に検量線を計算した (図3)。

結果として、グループ(a)の粒子では、理論値に近いZr濃度 (49-59 wt%) が得られ、今回の条件下でジルコンは完全に分解されたと考えられる。一方で、グループ(b)では、実験の過程でジルコンを1粒子紛失しており、もう一方の分析データは5.3 wt%と一桁低い値になった。また、グループ(c)では、ほとんどZrが検出されず (どちらも0.0012 wt%)、回収率が低いデータとなった。したがって、分解における操作過程を見直す必要がある。また、ブランク測定用のバイアルからもZrが検出されており、酸分解中の分解容器中で試料の溶液と混在した可能性があるが、原因の究明が課題である。

今後はクリーンブースでの作業や分析器具の選定を含めた分解過程の作業手順についても再検討し、ブランクレベルの低減を図る。また、He年代測定で実施する親核種 (U・Th・Sm) 濃度の測定は同位体希釈法が一般的であるが、国内ではU・Thスパイクの使用が困難であるため、同位体スパイクを使用しない親核種濃度の測定法が求められる。今後は検量線法による測

定を検討する予定である。これにより、当センターでのHe法におけるジルコンの湿式分析の技術整備を目指す。

謝辞

東京大学の浅沼尚博士には本研究に使用したジルコンを提供いただいた。本報告は平成31年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 (放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務) (国庫債務負担行為に係るもの) の成果の一部である。

引用文献

- Ault, A.K. et al. (2019): Innovations in (U-Th)/He, Fission Track, and Trapped Charge Thermochronometry with Applications to Earthquakes, Weathering, Surface-Mantle Connections, and the Growth and Decay of Mountains: *Tectonics*, 38, 3705-3739.
- Evans, N.J. et al. (2005): Determination of Uranium and Thorium in Zircon, Apatite, and Fluorite: Application to Laser (U-Th)/He Thermochronology: *Jour. Amer. Chem.*, 60, 1159-1165.
- Gautheron, C. et al. (2021): Technical note: apatite and zircon (U-Th)/He analysis using quadrupole and magnetic sector mass spectrometry: *Geochron.* 3, 351-370.
- 菅野瑞穂ほか(2021): 東濃地科学センターにおける鉍物試料の(U-Th)/He年代測定 (He測定編), *JAEA-Testing 2020-010*, 1-38.
- 山田国見・國分陽子 (2012): ジルコン(U-Th)/He法におけるジルコン分解と脱塩処理, *FTNL* 25, 54-55.



図1. 高温高圧酸分解容器の一式 (Model 4748: Parr社製). 白色のテフロンビーカーの中に、ジルコンをフッ酸に浸漬させた蓋付マイクロバイアルを入れ、金属製のジャケットで密閉して電気炉で加熱する.

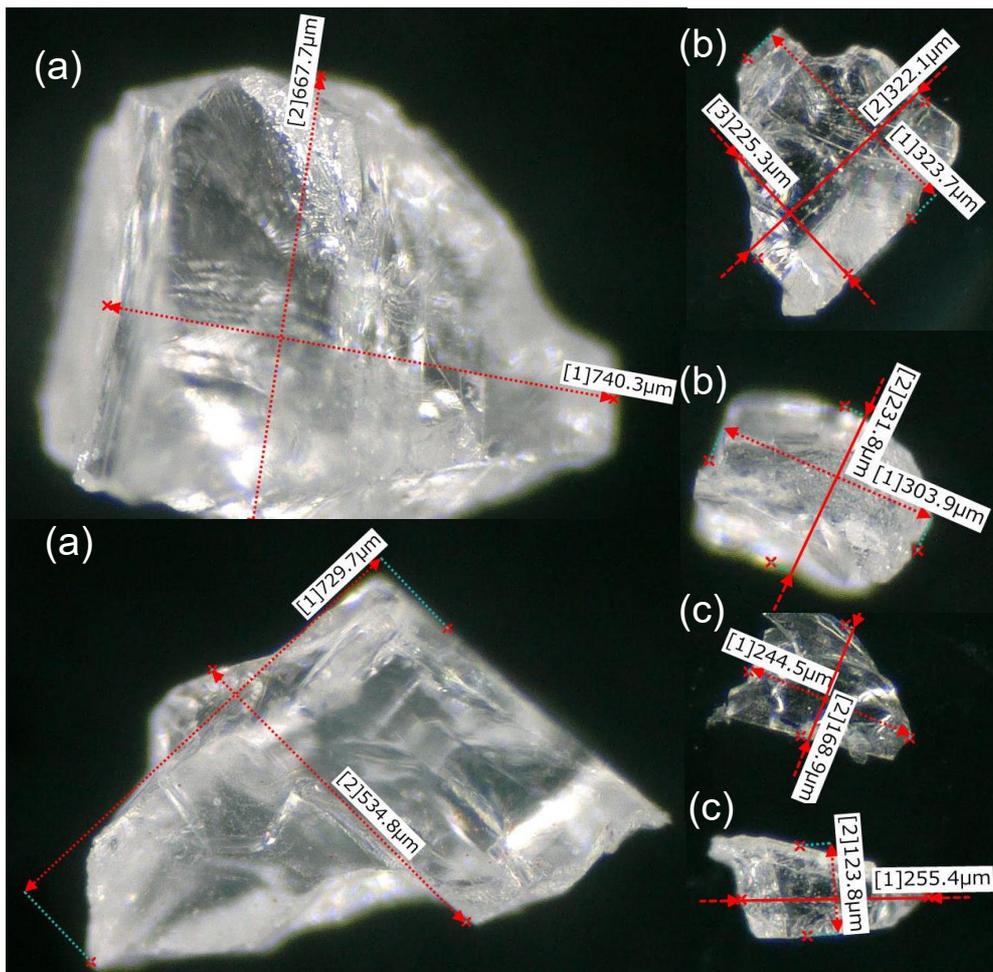


図2. 本分析に用いたアニーリング済みのジルコン粒子片.

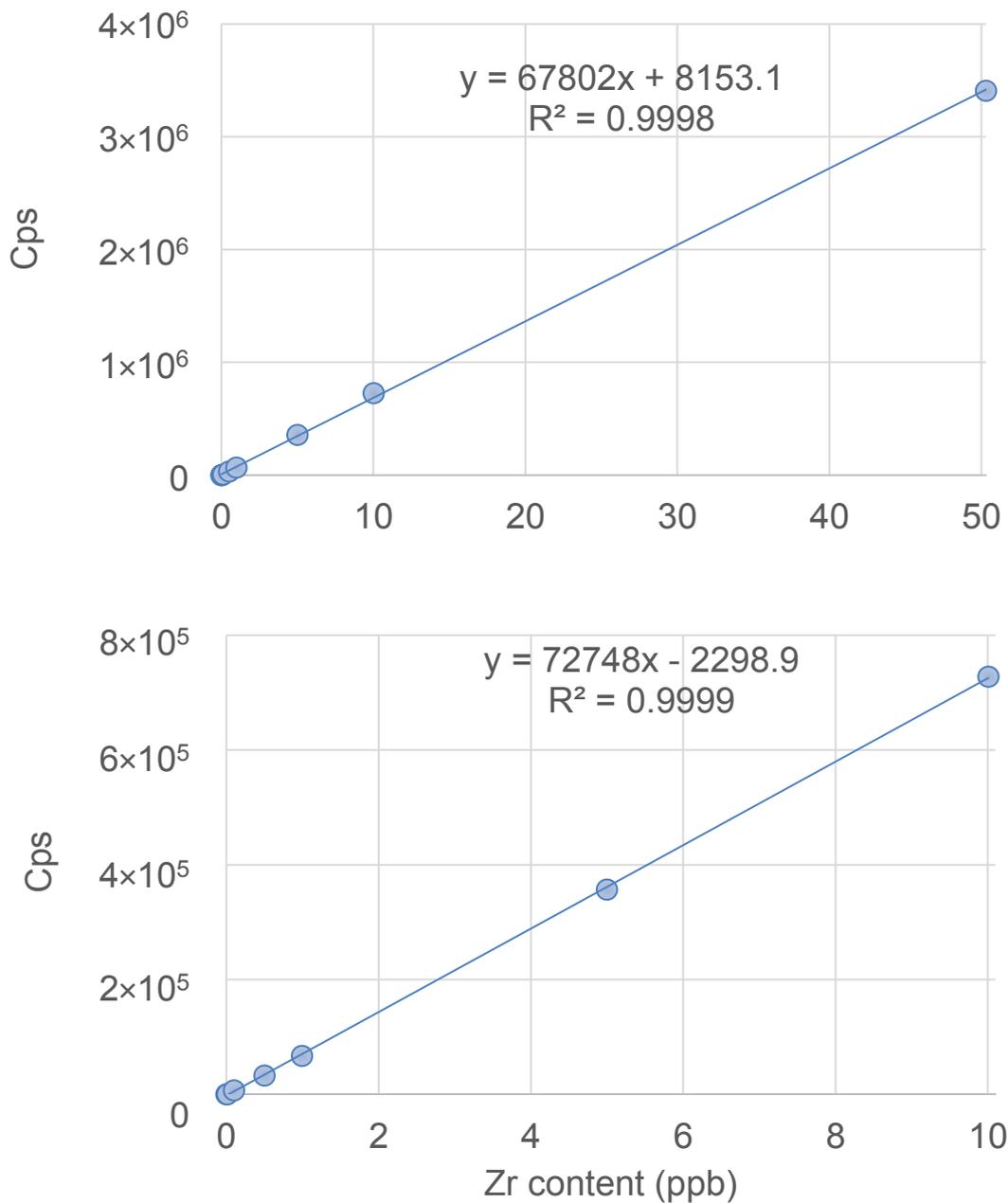


図3. XSTC-8標準溶液に基づく検量線. 下のグラフは, 50 ppbを除いて計算した場合. 本分析では, 分析溶液のZr濃度が10 ppb以下になるように希釈したため, 下の検量線を用いてZr濃度を計算した.

照来層群歌長流紋岩から得られたジルコンU-Pb年代

長田充弘*・福田将眞*・末岡 茂*・中嶋 徹*
梶田侑弥**・南 沙樹**・岡本 晃**・田上高広**

U-Pb zircon dates from the Utaosa Rhyolite of the Teragi Group
Mitsuhiro Nagata*, Shoma Fukuda*, Shigeru Sueoka*, Toru Nakajima*,
Yuya Kajita**, Saki Minami**, Akira Okamoto** and Takahiro Tagami**

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

**京都大学, Kyoto University

はじめに

近年, ジルコンを用いた年代測定 (例えば, U-Pb法, フィッション・トラック法 (以下 FT), (U-Th)/He法など) が一般的な手法となりつつあり, 2つ以上の分析 (年代, 温度, 同位体比など) を同時に行う技術開発も発達してきている (例えば, Iwano et al., 2020; Yuguchi et al., 2020). また, 従来では測定が困難であった若い地質单元 (例えば, 5 Ma未満) もジルコンを用いた年代測定が盛んに行われている (例えば, Ito et al., 2013; Minami et al., 2021). こうした近年の研究動向を踏まえると, 若くて複数の分析に対応した標準試料の需要が今後期待される. 兵庫県~鳥取県に分布する照来層群歌長流紋岩からは, 3.07-2.42 MaのジルコンのFT年代や(U-Th)/He年代が先行研究で得られており (宇都ほか, 1994; Tagami et al., 2003; Fukuda et al., 2021; 福田ほか, 2022), 照来層群歌長流紋岩中のジルコンは(U-Th)/He年代の標準試料の候補としても期待されている (例えば, 福田ほか, 2022). 小論では, 照来層群歌長流紋岩では検討されていなかったジルコンU-Pb年代について報告し, その意義を述べる.

調査地域の地質概説

照来層群 (弘原海・松本, 1958) は兵庫県~鳥取県に分布し, 基盤岩である花崗岩や漸新

統~中新統北但層群を不整合に覆う. 照来層群は一般に, 下位より基底礫岩層, 歌長流紋岩, 湯谷礫岩層, 春來泥岩層, および寺田火山岩類からなると理解されている (例えば, 宇都ほか, 1994; 古山・長尾, 2004). ただし, 歌長流紋岩は照来層群にみられる流紋岩 (溶岩・火山砕屑岩) の総称的区分であり, 厳密には湯谷礫岩層などより上位に分布するものもある (例えば, 宇都ほか, 1994).

年代測定試料

採取した試料は宇都ほか (1994) のTRG04と同一露頭の試料 (TRG04-21) とTRG05の露頭付近の試料 (TRG07-21) である. これらの試料は春來泥岩層よりも上位に位置する歌長流紋岩に該当する. TRG04 (TRG04-21) からは 2.52 ± 0.04 Maの黒雲母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代 (Uto et al., 1997), 2.48-2.30 Maの黒雲母K-Ar年代 (宇都ほか, 1994), 2.72 ± 0.22 MaのジルコンFT年代 (宇都ほか, 1994), および 2.61-2.42 Maのジルコン(U-Th)/He年代 (Tagami et al., 2003; Fukuda et al., 2021; 福田ほか, 2022) が得られている. また, TRG05 (TRG07-21) からは 2.42 ± 0.42 Maの黒雲母K-Ar年代 (宇都ほか, 1994), 3.07 ± 0.36 MaのジルコンFT年代 (宇都ほか, 1994), および 2.66 ± 0.15 Maのジルコン(U-Th)/He年代 (Fukuda et al., 2021; 福田ほか, 2022) が得られている.

ジルコンU-Pb年代測定手法

基本的な測定の手順や分析条件などは Minami et al. (2021) とほぼ同様なので、以下にその概要のみ述べる。鉱物分離によって得られたジルコンは、樹脂包埋し、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設置の電界放出型電子プローブマイクロアナライザ (JEOL JXA-8530F) を用いて、カソード・ルミネッセンス (CL) 像を取得した。CL 像観察の結果、歌長流紋岩2試料のジルコンはいずれもシャープな自形を呈し、コアやリムといった構造は認められず、顕著な累帯構造も認められなかった。その後、同センター設置のレーザー焼灼マルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析装置 (Analyte G2 + Neptune-Plus) を用いてU-Pb同位体分析を行った。未知試料と共に測定したOD-3ジルコン (Iwano et al., 2013; 参照値 33.0 ± 0.1 Ma) は参照値と整合的であった。得られたデータは諸鉛補正や放射非平衡補正 (例えば, Sakata, 2018) をおこなっていない。

U-Pb年代測定結果

TRG04-21のジルコン21粒子22点から3.0–2.5 Maの $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代が得られ、これらの年代は誤差範囲で重複する。それらのTh/Uは0.44–1.23を示す。22点による加重平均値は 2.65 ± 0.16 Ma (2σ ; MSWD = 0.13) を示した。一方、TRG07-21のジルコン19粒子20点から2.9–2.5 Maの $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代が得られ、これらの年代は誤差範囲で重複する。それらのTh/Uは0.67–1.38を示す。20点による加重平均値は 2.66 ± 0.15 Ma (2σ ; MSWD = 0.079) を示した。

考察

小論の結果より、TRG04-21およびTNG07-21から 2.65 ± 0.16 Ma および 2.66 ± 0.15 Ma の加重平均値を得た。これらはそれぞれの地点ごとに得られている測定手法の異なる

各年代 (詳細は採取試料の欄) と誤差範囲で重複する (図1)。従って、最も高い閉鎖温度を示すU-Pb年代の閉鎖温度の約900°Cから(U-Th)/He年代の閉鎖温度である約160°Cまで急冷したことを示す (図1)。本研究で得られた年代は照来層群歌長流紋岩の形成年代に近似されると考えられる。

また、本研究で得られたジルコン (特にTRG04-21) は、次のような点からFukuda et al. (2021) や福田ほか (2022) が指摘している(U-Th)/He年代だけでなく、U-Pb年代の標準試料の候補であると考えられる。1) 得られたジルコンがいずれも自形であること、2) ジルコンのCL像はコア・リムといった構造や累帯構造がなく、比較的均質であること、3) 本研究で得られた個々のU-Pb年代は誤差範囲で重複し、古い年代を示すものがなく、比較的均質であること、および4) 本研究で得られたU-Pb年代の加重平均値は、上述したように先行研究の他の測定手法で得られた年代と誤差範囲で重複することである (図1)。今後もこれらのジルコンを用いて様々な測定 (濃度, 同位体, 年代など) を行い、標準試料としての適性を評価していく。

謝辞

本研究は、平成31年度放射性廃棄物共通技術調査等事業 (放射性廃棄物に係る重要な基礎的技術に関する研究調査の支援等に関する業務) (国庫債務負担行為に係るもの) の成果の一部である。株式会社京都フィッシュン・トラックの岩野英樹博士と檀原 徹博士には、小論にかかる鉱物分離をしていただいた。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の皆様には、CL撮影や年代測定に際して、様々な便宜をはかっていただいた。以上の方々に、深く御礼申し上げる。

文献

Fukuda S. et al., 2021. Evaluation of zircon from the Pliocene Utaosa rhyolite Japan

- as reference material for (U-Th)/He thermochronometry. Abstract of Thermo2021 (17th International Conference on Thermochronology), Santa Fe (online hybrid).
- 福田ほか, 2022. ジルコン(U-Th)/He法の年代標準試料の探求 (続報) : 複数のジルコン試料における年代学的検討. フィッション・トラック ニュースレター, 35, 7-10.
- 古山・長尾, 2004. 照来コールドロンのK-Ar年代. 火山, 49, 181-187.
- Ito, H. et al., 2013. Earth's youngest exposed granite and its tectonic implications: the 10-0.8 Ma Kurobegawa Granite. Scientific Reports, 3, 1-5.
- Iwano, H. et al., 2020. Zircon fission-track and U-Pb double dating using femtosecond laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry: A technical note. Island Arc, 29, e12348.
- Iwano, H. et al., 2013. An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as a secondary U-Pb dating standard. Island Arc, 22, 382-394.
- Minami et al., 2021. Two pulse intrusive events of the Pliocene Tanigawa-dake granites revealed from zircon U-Pb dating. Earth, Planets and Space, 73, 231.
- Sakata, S. 2018. A practical method for calculating the U-Pb age of Quaternary zircon: Correction for common Pb and initial disequilibria. Geochemical Journal, 52, 281-286.
- Tagami, T. et al., 2003. (U-Th)/He geochronology of single zircon grains of known Tertiary eruption age. Earth and Planetary Science Letters, 207, 57-67.
- Uto, K. et al., 1997. Laser-heating $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating system of the Geological Survey of Japan: System outline and preliminary results. Bulletin of the Geological Survey of Japan, 48, 23-46.
- 宇都ほか, 1994. 山陰地方東部, 鮮新統照来層群火山岩類の K-Arおよびフィッショントラック年代. 地質学雑誌, 100, 787-798.
- 弘原海・松本, 1958. 北但馬地域の新生界層序: 近畿西北部の新生界の研究 (その1) . 地質学雑誌, 64, 625-637.
- Yuguchi, T. et al., 2020. Simultaneous determination of zircon U-Pb age and titanium concentration using LA-ICP-MS for crystallization age and temperature. Lithos, 372, 105682.

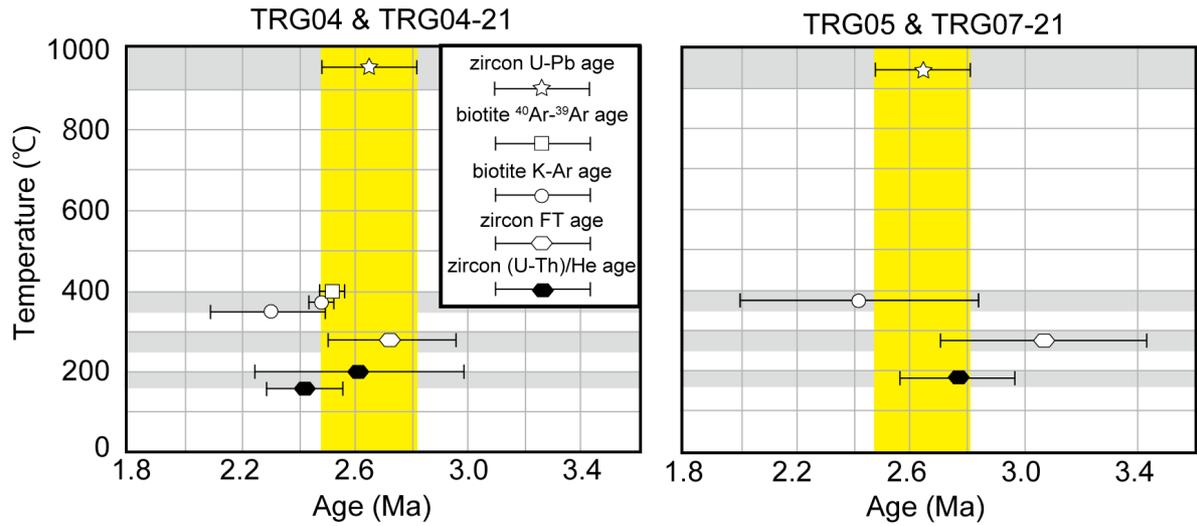


図1. TRG04 (TRG04-21) とTRG05 (TRG07-21) の照来層群歌長流紋岩から得られている年代のまとめ

Fig. 1. Summary of ages obtained from the Utaosa Rhyolite of the Teragi Group at TRG04 (TRG04-21) and TRG05 (TRG07-21).

北上山地における熱年代学データとその解釈

梶田侑弥*・末岡 茂**・福田将眞**・田上高広*

Thermochronological data in the Kitakami Mountains and their interpretation

Yuya Kajita*, Shigeru Sueoka**, Shoma Fukuda** and Takahiro Tagami*

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

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

はじめに

弧-海溝系における前弧域の隆起・沈降は、プレート沈み込み帯のテクトニクスを大きく反映したものと考えられる。しかしながら、東北日本弧前弧域では、地質学的時間スケールでの隆起・削剥の定量的議論はほとんどなされておらず、プレート運動との関係も不明瞭である。そこで本研究では東北日本弧前弧域に分布する北上山地を対象に、白亜紀深成岩類のアパタイトフィッシュン・トラック (AFT) 年代, アパタイトヘリウム (AHe) 年代のこれまでの結果 (梶田ほか, 2021) に、FT長分布を用いた熱史逆解析結果を加えた熱年代学データの解釈を試みた。

熱史逆解析

鉱物中に残されるFTは時間経過によって短縮・消滅し、この現象はアニーリングと呼ばれる。この時の短縮率は温度と時間をパラメーターとしたアニーリング関数によって支配されることが知られている (Ketcham, 2019)。熱史逆解析では試料中のFT長分布とアニーリング関数を利用して、試料の熱史の推定を行う。本研究では熱史逆解析ソフトHeFTy ver. 1.9.3 (Ketcham, 2005) を用いた。

結果・考察

AFT年代は東縁部の約130 Maから西に向かって70 Ma程度まで若くなる。一方AHe年代は西縁部の約 80 Maを除けば約50~30 Maにまとまる。北上山地の白亜紀深成岩類のジルコ

ンU-Pb年代は135~120 Ma (e.g., Osozawa et al., 2019) でほぼ均一なので、AFTとAHe年代の傾向は岩体の形成年代の不均質が原因ではないと考えられる。またFT長を用いた熱史逆解析結果はいずれも徐冷を示し (図1)、短期的な熱イベントの存在は積極的には支持されない。以上から、10⁶年以上のスケールでの地殻浅部における熱構造史もしくは隆起・削剥史が東西で異なると考えられる。ただし、西縁部のAFTとAHe年代については、ほぼ同じ年代を示し、熱水イベントなどの局所的な加熱・急冷が示唆されるため、広域的なテクトニクスを反映していないと考え、以下の議論からは除く。

熱構造史が異なる可能性としては、火山フロントの移動の影響が考えられる。このとき火山フロントはAFT年代の下限である約70 MaからAHe年代の上限の約50 Maの間に北上山地中央付近にあったと想定される。ただし、北上山地中央部では70~50 Maの火成活動を示唆する火成岩は見つかっていない。

一方で隆起・削剥史が異なる場合、AFT年代からは沿岸部より内陸側を隆起させる隆起形態が考えられる。同様にAHe年代からは東西でほぼ一様な隆起が推定される。10⁶年以上の前弧域の隆起には底付け付加が支配的な要因の一つとなり得る (underplating model; Menant et al., 2020)。このunderplating modelでは、島弧横断方向に隆起量の差が見られ、沿岸部よりやや内陸側に隆起のピークを生じる。これはAFT年代の東西傾向に整合的である。また、沈み込むプレート速度が5 cm/yr以下では

underplating modelの隆起が起きないことも示されている。土谷ほか(1999)によると北上山地ではアダカイト質の浄土ヶ浜流紋岩類の活動時期(約44 Ma; 梶田ほか, 2021)には暖かいプレートが沈み込んでおり、海洋プレートの沈み込み速度は比較的低速であったと考えられる。つまり、この時期の前後には底付け付加の隆起が停止していた可能性が高い。その後、底付け付加による隆起は再開したが、沈み込むプレートが交代したことにより、AHe年代に東西で差をもたらしほどの削剥量の違いを生むに至らなかった可能性が考えられる。

今後の課題としては、①熱史逆解析地点数の増加、②HeFTy以外の熱史逆解析ソフト(QTQt; Gallagher, 2012)の利用、②より複合的な隆起・削剥モデルとの比較検討、などが挙げられる。

謝辞

本報告は経済産業省資源エネルギー庁委託事業「平成30-令和2年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業(地質環境長期安定性評価技術高度化開発)(JPJ007597)」の成果の一部である。また、本研究は平成26-30年度文部科学省新学術研究領域「異なる時空間スケールにおける日本列島の变形場の解明」(代表: 鷲谷 威, 課題番号26109003)によって助成された。

引用文献

梶田侑弥・末岡 茂・福田将真・横山立憲・鏡味沙耶・長田充弘・田上高広, 2021, アパタイトフィッション・トラック熱年代学に基づく北上山地の削剥史の推定, FTNL,

34, 14-16

Ketcham, R. A., 2019, Fission-track annealing: from geologic observations to thermal history modeling. *Fission-Track Thermochronology and its Application to Geology*, 49-75.

Ketcham, R. A., 2005, Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 58(1), 275-314

Osozawa, S., Usuki, T., Usuki, M., Wakabayashi, J., & Jahn, B. M., 2019, Trace elemental and Sr-Nd-Hf isotopic compositions, and U-Pb ages for the Kitakami adakitic plutons: Insights into interactions with the early Cretaceous TRT triple junction offshore Japan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 184, 103968.

Menant, A., Angiboust, S., Gerya, T., Lacassin, R., Simoes, M., & Grandin, R., 2020, Transient stripping of subducting slabs controls periodic forearc uplift. *Nature communications*, 11(1), 1-10.

土谷信高・古川聡子・木村純一, 1999, 北上山地古第三紀浄土ヶ浜流紋岩類の岩石学的研究-パーアルミナスなアダカイト質マグマの成因, 地質学論集, 53, 57-83

Gallagher, K., 2012, Transdimensional inverse thermal history modeling for quantitative thermochronology. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 117(B2)

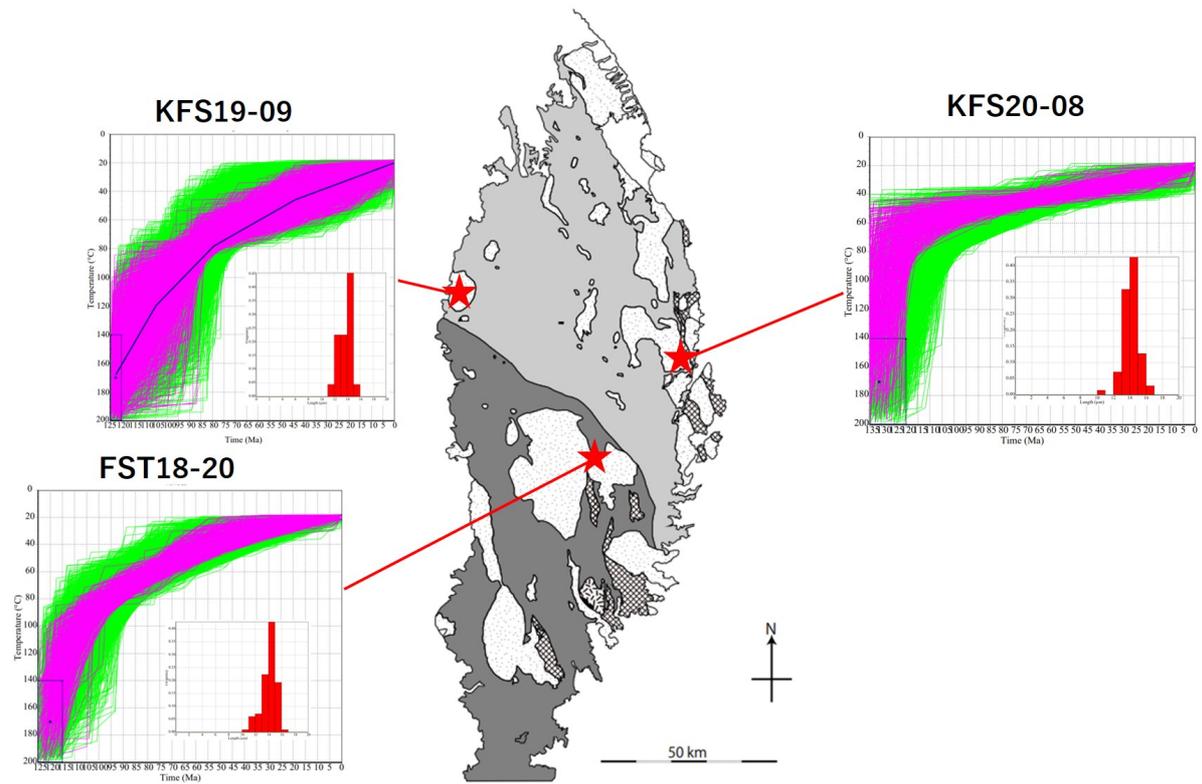


図1. 北上山地におけるFT長分布とその熱史逆解析結果

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

南 沙樹*・末岡 茂**・福田将真**・長田充弘**・Barry P. Kohn***
横山立憲**・鏡味沙耶**・梶田侑弥*・田上高広*

Estimation of thermal/denudation histories in the Tanigawa-dake area
based on thermochronological methods

Saki Minami*, Shigeru Sueoka**, Shoma Fukuda**, Mitsuhiro Nagata**,
Barry P. Kohn***, Tatsunori Yokoyama**, Saya Kagami**,
Yuya Kajita* 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

一般的に花崗岩は、地下数km~数十kmの地殻深部で形成される。よって、形成年代の若い花崗岩が現在地表に露出する地域は、極めて急速な隆起・削剥を受けている可能性がある。約5 Maより若い花崗岩の分布は、世界的に見ると変動帯に集中している (Harayana, 1992)。変動帯に属する日本列島でも、飛騨山脈の黒部川花崗岩や南部フォッサマグナ地域の丹沢トータル複合岩体などで、ジルコンU-Pb年代測定 (閉鎖温度 > 900°C; Cherniak and Watson, 2000) により、それぞれ約0.8 Ma (Ito et al., 2013), 約4.0 Ma (Tani et al., 2010) の若い形成年代の花崗岩が報告されている。

本研究の対象地域である谷川岳地域は、東北日本弧南部の背弧側にあり、新潟―神戸ひずみ集中帯付近に位置する。この地域の地質は主に、後期白亜紀~古第三紀の花崗岩類 (例えば、後期白亜紀水上石英閃緑岩; 茅原ほか, 1981) と、これらに貫入する後期中新世~鮮新世頃の谷川岳花崗岩類 (赤湯岩体・谷川岩体・巻機岩体; 茅原ほか, 1981) で構成され、周辺に苗場山・飯土山などの第四紀火山が分布する (Figure 1)。筆者らのは、谷川岳花崗岩類の巻機岩体や谷川岩体で若いジルコンU-Pb年代 (約4.0~3.2 Ma; Minami et al.,

2021) が報告されている。ほかにも先行研究では、形成年代を表す全岩Rb-Sr年代 (5.27 ± 1.28 Ma; 大平・本多, 1999) や、約280~400°C付近の冷却年代を表すジルコンフィッシュン・トラック (ZFT) 年代と黒雲母K-Ar年代 (3.9~2.9 Ma; 川野ほか, 1992; 大平・本多, 1999; 佐藤, 2016), 閉鎖温度が約90~120°Cのアパタイトフィッシュン・トラック (AFT) 年代 (約 2.4 ± 0.3 Ma; 大平・本多, 1999) が報告されている。東西約35km, 南北約25km (佐藤, 2016) の大規模に露出する谷川岳花崗岩類について、ジルコンU-Pb年代の分析地点は3地点のみであり、岩体を構成する貫入年代データは不十分である。また、黒雲母K-Ar年代とZFT年代の閉鎖温度を考えると、280°C以上の高温側の熱史は比較的制約されている。一方で、低温側についてはAFT年代が1地点で報告されているのみであり、熱史は不明である。よって本研究では、谷川岳花崗岩類およびこれらに貫入される後期白亜紀水上石英閃緑岩について、次の2つの分析を実施した。(1) Minami et al. (2021)の未分析地点について高精度に岩体の形成年代を推定するためにジルコンU-Pb年代測定, (2) 山地全体について、約200°C以下の低温側の熱史・削剥史を推定するためにジルコンとアパタイトの(U-Th)/He年

代測定 (ZHe年代: 閉鎖温度160~200°C, AHe年代: 閉鎖温度55~80, Reiners, 2005) .

測定手法

ジルコンU-Pb年代測定について, まずジルコン成長構造に相当するカソード・ルミネッセンス (CL) 像を撮影するために, 日本原子力研究開発機構 (JAEA) の電子プローブマイクロアナライザ (JEOL JXA-8530F) と京都大学岩石学研究室所有の電子プローブマイクロアナライザ (JEOL JXA-8105) を用いてジルコンのCL像撮影を行った. U-Pb同位体分析には, JAEAのLA-ICP-MS (LA: Analyte G2; Photon Machines, ICP-MS: Neptune-Plus, Thermo Fisher Scientific) を用いた. 各試料20~30粒子ずつのジルコンについて, CL像で同定されたリム部分のU-Pb同位体分析をすることで, 花崗岩類の貫入年代の推定を行った. また年代値は, コンコーディア年代を採用した. ZHe, AHe年代測定は, メルボルン大学に分析を依頼した. ZHe, AHe年代測定は, メルボルン大学で定量分析をおこなった. HeはPrisma QMS 200で定量し, U, Th, SmはCoherent Quattro FAP 820nmダイオードレーザーとICP-MS (Agilent 7700X) を組合わせたLA-ICP質量分析法にて定量した. 年代値は, 各試料3~6粒子の単粒子年代の加重平均年代を採用した.

結果とその解釈

ジルコンU-Pb年代測定より, 赤湯岩体と谷川岩体最西部 (TNG20-02, 01), 谷川岩体中央部 (TNG20-03, 10), 巻機岩体南部 (TNG20-04, 05, 06) の年代値は, それぞれ 2σ の誤差範囲で有意差が認められない (Figure 2). よって谷川岳花崗岩類は, 赤湯岩体と谷川岩体最西部が約6.0~5.5 Ma, 巻機岩体南部が約4 Ma, 約3.3~3.2 Ma, の少なくとも3回の貫入で形成されたことが明らかになった. ジルコンU-Pb年代, ZHe, AHe年代の温度-年代パスをプロットすると, ジルコンU-Pb

年代の閉鎖温度 (約900°C) からZHe年代の閉鎖温度 (約180°C) までのパスは初期冷却を反映したと考えられる (Figure 2). よって, 最近の山地形成に関連した削剥を最も反映したと期待される, AHe年代の閉鎖温度から地表温度 (10°C) の平均冷却速度を計算すると, 山頂稜線の東側に位置する巻機岩体 (TNG20-05, 06) と水上石英閃緑岩 (貫入年代109.4 Ma (TNG20-09); Minami et al., 2021) で13~36°C/Ma, 稜線西側の谷川岩体の1地点 (TNG20-10) で36~60°C/Maと推定された. さらに稜線東側では, AHe年代が約3~2 Ma頃に集中しており (Figure 2), この時期に古い岩体と若い岩体が一様に急速に削剥されたことが示唆される. 地温勾配が時空間変化せず一定であること (約40~50°C; Tanaka et al., 2004) を仮定し, AHe年代から得られた削剥速度について, 飛騨山脈 (Spencer et al., 2019) や丹沢山地 (Yamada & Tagami, 2008) や東北日本弧 (Sueoka et al., 2017) と同じ計算方法と比較すると, 谷川岳地域の削剥速度は約0.5~1.1 mm/yrが得られ, 島弧-島弧衝突帯の丹沢山地や, 歪の集中で知られる奥羽脊梁山地のような地殻変動が活発な地域に匹敵することが示唆された (Figure 3).

結論

谷川岳地域の鮮新世谷川岳花崗岩類と, 後期白亜紀水上石英閃緑岩について, ジルコンU-Pb, ZHe, AHe年代測定を実施した. その結果, 次のことが明らかになった; 1) 谷川岳花崗岩類は, 少なくとも3回の貫入で形成された, 2) 谷川岳の稜線東側は, 約3~2 Ma頃に古い岩体と若い岩体が一様に削剥された, 3) 谷川岳地域は, 地殻変動が活発な丹沢山地や東北日本弧の奥羽脊梁山脈に匹敵する削剥速度であった.

謝辞

本研究は経済産業省資源エネルギー庁委託事業「令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層

処分に関する技術開発事業（地質環境長期安定性評価技術高度化開発）（JPJ007597）」の成果の一部である。本研究は文科省科研費21K03730によって助成された。CL像の撮影は、JAEAの小北康弘氏、京都大学の鈴木康太氏にご助力いただいた。

引用文献

- Cherniak, D.J., Watson, E.B. (2000) Pb diffusion in zircon. *Chem. Geol.*, 172, 5–24.
- 茅原一也ほか (1981) 「越後湯沢地域の地質」地域地質研究報告 5万分の1図幅 新潟 (7) 第75号.
- 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.
- Ito, H. et al. (2013) Earth's youngest exposed granite and its tectonic implications: the 10–0.8 Ma Kurobegawa Granite. *Scientific Reports*. 3:1306.
- 川野 良信ほか (1992) 谷川岳深成岩体のK-Ar年代. *岩鉱*, 87, 221-225.
- Minami, S. et al. (2021) Two pulse intrusive events of the Pliocene Tanigawa-dake granites revealed from zircon U–Pb dating. *EPS*, 73:231.
- 大平 寛人・本多 照幸 (1999) 北部フォッサマグナ谷川岳深成岩体のフィッション・トラック年代とジルコンのTh/U比, *FTNL*, 12, 61-63.
- Reiners, P.W. & Ehlers, T.A. eds. (2005) *Low-Temperature Thermochronology: Techniques, Interpretations, and Applications*. Mineralogical Society of America.
- 佐藤 興平 (2016) 谷川岳花崗岩体の年代とフォッサマグナ地域における新第三紀の珪長質火成活動. 群馬県立自然史博物館研究報告, 20, 85-104.
- Spencer, C. et al. (2019) Rapid Exhumation of Earth's Youngest Exposed Granites: Driven by Subduction of an Oceanic Arc. *Geophys. Res. Lett.*, 10.1029
- Sueoka, S. et al. (2017) First report of (U–Th)/He thermochronometric data across Northeast Japan Arc: implications for the long-term inelastic deformation. *EPS*, 69:79.
- Tanaka, A. et al (1999) Complication of thermal gradient data in Japan on the basis of the temperatures in boreholes (in Japanese with English abstract). *Bull. Geol. Surv. Jpn.*, 50, 457– 487.
- Tanaka, A. et al. (2004) Geothermal gradient data in and around Japan, digital geoscience map DGM P-5. *Geol. Surv. Japan*, Tsukuba.
- Tani, K. et al. (2010) Syncollisional rapid granitic magma formation in an arc-arc collision zone: Evidence from the Tanzawa plutonic complex, Japan. *Geology*, 38, 215-218.
- Yamada, K. & Tagami, T. (2008) Postcollisional exhumation history of the Tanzawa Tonalite Complex, inferred from (U–Th)/He thermochronology and fission track analysis. *Jour. Geophys. Res.*, 113, B03402.

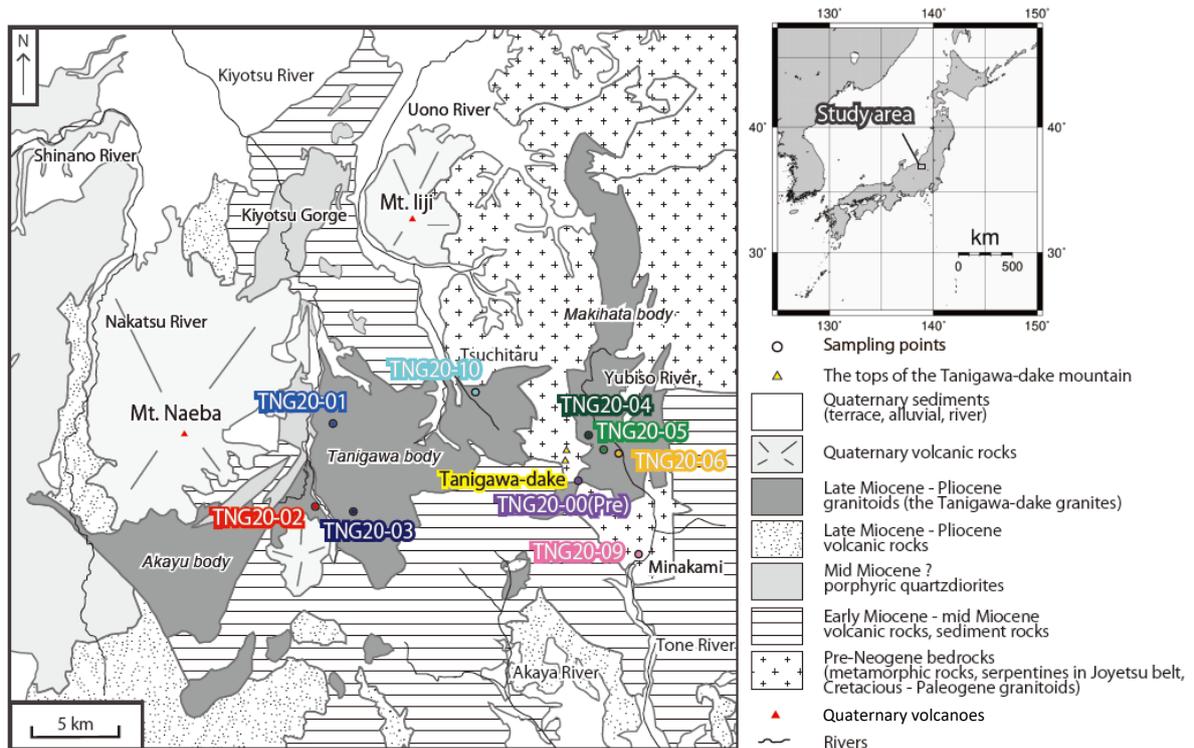


Figure 1. 地質概略図と試料採取地点
 佐藤 (2016) と産総研のシームレス地質図V2を引用した(<https://www.gsj.jp/license/license.html>). ○が試料採取地点を示す.

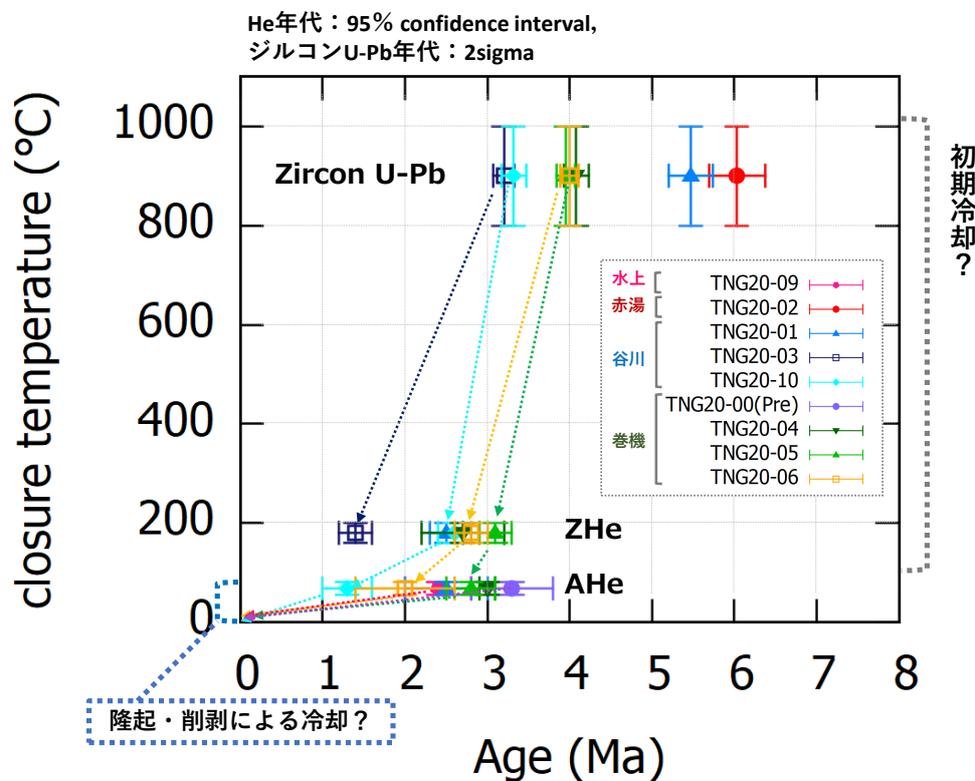


Figure 2. 谷川岳地域の温度-年代パス
 縦軸が各測定手法の閉鎖温度で、横軸が年代値を表す。但し、TNG20-03, 05, 09, 10のジルコンU-Pb年代は、Minami et al. (2021)から引用した。

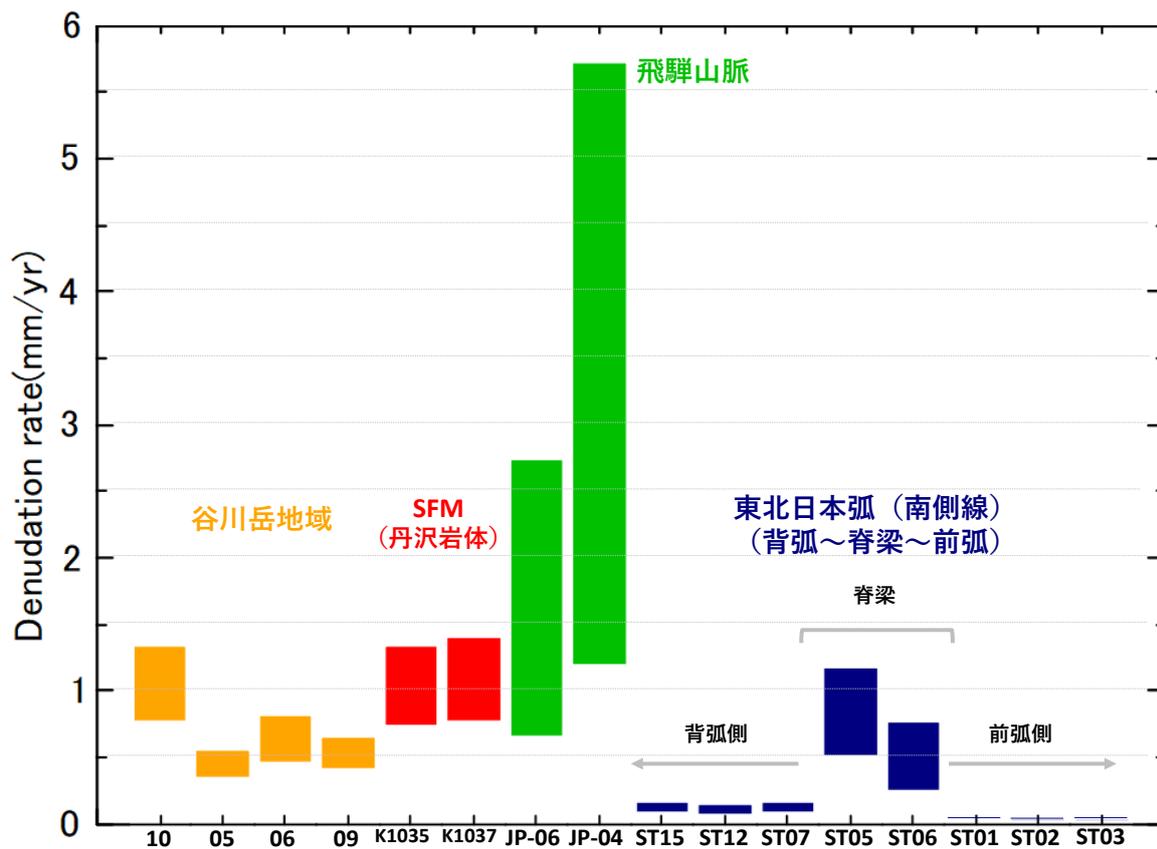


Figure 3. 他の地域との平均削剥速度の比較

AHe年代と各地域の地温勾配を用い、同一の計算方法で平均削剥速度を算出した。AHe年代と地温勾配の引用は次の通り：飛驒山脈 (Spencer et al., 2019; Tanaka et al., 2004) , 丹沢山地 (Yamada & Tagami, 2008; Tanaka et al., 1999) , 東北日本弧南側線 (Sueoka et al., 2017; Tanaka et al., 2004) .

210-lead dating of lacustrine sediment: Tsagaan Lake in Valley of the Gobi Lakes in Mongolia

Shuukhaaz Ganbat*, Noriko Hasebe**, Davaadorj Davaasuren***,
Uyangaa Udaanjargal* and Yuma Shibuya*

* Department of Earth Sciences, Kanazawa University

** Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University

*** School of Arts and Sciences, National University of Mongolia

Introduction

Mongolia is a landlocked country in North-Central Asia in transition zone between Siberian taiga and arid region of Central Asia through dry steppes. Climate is extremely variable relative to same latitude's countries, as it is controlled by the Westerlies, East Asian Summer Monsoon (EASM), and Siberian anticyclone. The climate change intensively impacts its environment and life of local people (IPCC, 2014). Paleoenvironment study is important to understand the intensity of climate fluctuation and related environmental issues, and to implement the environmental management. Past environmental information is often reconstructed by analyses of sedimentary archives. A reliable age dating method is a crucial to explain the climate oscillation in the past. Thus, we aim to conduct the ^{210}Pb dating method for the recent sediment collected from Tsagaan lake in Mongolia.

A total ^{210}Pb activity in the sediment is comprised of the unsupported ($^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$) and supported ^{210}Pb . A fraction of the ^{222}Rn atoms produced by the decay of ^{226}Ra in soils escape into the atmosphere where they decay through a series of short-lived radionuclides to ^{210}Pb . Whereas, supported ^{210}Pb radionuclide is continuously produced by the in-situ decay of ^{226}Ra in bottom sediments. $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ is expressed

as subtracting the supported ^{210}Pb from total ^{210}Pb . According to the radio decay law, the $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ concentration is exponentially decreased along the sediment profile when sediment input and $^{210}\text{Pb}_x$ input is constant through the time. Based on the exponentially decreasing pattern of $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ profile, it is possible to establish the last ~150 years of sediment chronology. We retrieved a short core sample (~130 cm depth, CoreID - 18TS1) from the Tsagaan lake in 2018. Total 26 samples were prepared by 1 cm and 2 cm intervals for radioisotope measurement. The activity concentration of each prepared sample was measured by a high purity Ge-detector in the RI laboratory, Kanazawa University. To interpret the $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ profile, we used the Constant Rate of Supply (CRS), Constant Initial Concentration (CIC), and Constant Flux and Constant Supply (CFCS) models (Appleby and Oldfield, 1978; Krishnaswamy et al., 1971; Robbins and Edgington, 1975) to establish the relative age of the lacustrine sequences.

Results and Discussions

A concentration of $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ was 132 Bq/kg on SWI (Sediment Water Interface), then decreased between 0 and 26 cm depth (Figure 1-A). However, the profile does not show monotonic decreasing trend, showing that the

assumption of constant sediment and $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ supply is not realistic in this lake. Based on the concentration of $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$, CRS, CIC, and CFCS models were applied (Figure 1-B). According to the comparative estimation of different models, the CRS model can reveal the reliable age estimation for the down core profile relative to other models, and this model estimated 24 cm sediment deposited during 87 years. Mass accumulation rate is calculated based on the CRS age and mass depth profile, and it varies through time (Figure 1-C). The average is approximately 1.001 g/cm² year. The low accumulation rate is associated with the increasing concentration of $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ obtained at 15 cm depth and 20 cm depth (Figure 1-A, C). Whereas the CIC model results are not sequenced with depth profile. Because this model assumes the constant rate of sedimentation, the increasing concentration of $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ in 10-14 cm and 18-20 cm depths is impossible to explain. The CFCS model ages, based on both the sedimentation rate and atmospheric flux of ^{210}Pb are constant, were relatively older than the CIC and CRS age model. This model calculated 139 years at 28 cm depth. The age estimation range of the CFCS model is wider than the CRS and CIC models. But the uncertainty of age estimation was higher than in the CRS and CIC models.

Summary

The concentration of $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ is measured from the top sediment until 26 cm depth. The ^{210}Pb

age dating results reveal relatively different sedimentation rate for the 18TS1 core based on distinct assumptions in age estimate. Age estimation by the CIC model reports shorter sedimentation time, whereas the CFCS model reveals a longer age estimation, the uncertainty was wider than the CIC and CRS models' age uncertainty. The CRS model can prove a reliable age with less uncertainty and indicates the variable sediment input rate..

References

- Appleby, P.G., Oldfield, F., 1978. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *CATENA* 5, 1–8. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(78\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(78)80002-2)
- IPCC (Ed.), 2014. Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional, in: *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, 867–952. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.022>
- Krishnaswamy, S., Lal, D., Martin, J.M., Meybeck, M., 1971. *Earth and Planetary Science Letters* 11 (1971) 407-414.
- Robbins, J.A., Edgington, D.N., 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137 . *Geochimica et Cosmochimica Acta* 39, 285–304. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(75\)90198-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(75)90198-2)

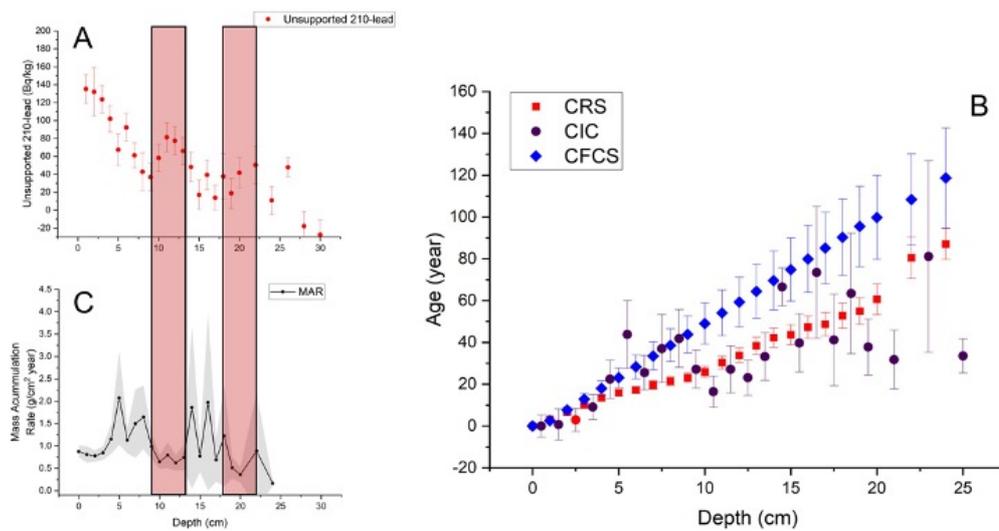


Figure 1. (A) Down core profile of $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (Unsupported ^{210}Pb). (B) Chronology Results obtained by 3 different models, Constant Rate of Supply (CRS), Constant Initial Concentration (CIC), and Constant Flux and Constant Supply (CFCS) models. (C) Mass Accumulation Rate based on CRS model result, red bars indicate that the mass accumulation rate associates to the increasing pattern of $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ concentration.

Am線源, Cf線源を利用したアルファリコイルトラックの形成実験

中島大輝*・横山明彦*・山田記大*・長谷部徳子*・飯沼勇人**・高宮幸一**

Experiments on the formation of alpha recoil tracks
using Am and Cf radiation sources

Taiki Nakashima*, Akihiko Yokoyama*, Norihiro Yamada*, Noriko Hasebe*,
Yuto Inuma** and Koichi Takamiya**

** 金沢大学, Kanazawa University

** 京都大学, Kyoto University

1. はじめに

アルファリコイルトラック (ART) は, ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th およびその娘核種がアルファ壊変した際に残った原子核がその反動で動いたときにできる損傷のことである。ウランとトリウムの壊変定数が既知の場合, 鉱物内のART数とウラン・トリウム濃度を測定することで鉱物の年代を算出することができる。実際に金雲母や黒雲母では算出された年代と既知年代はほぼ一致していることが確認されている (Gogen and Wagner, 2000)。人工的にARTを形成することができれば適切なエッチング条件の検討, 鉱物表面の性質, 熱履歴調査のための加熱時の特性など様々な研究に応用することができるが, この分野の研究はあまり進んでいない (Hashimoto et al., 1980; Glasmacher et al., 2003)。

本研究では ^{241}Am と ^{252}Cf のアルファ線源を用いて人工的なARTの形成手法を確立することを目的とした。手法の確立により, 雲母以外の様々な鉱物におけるARTの形状や特性の理解を深めることができ, 地球年代学のさらなる発展に貢献できると考えられる。

2. 実験

人工的にARTを作成するためには, 重元素を100keV程度の低エネルギーで鉱物表面に照射する必要がある。本研究ではアルファ壊変を行う放射性元素を用い, アルファ壊変によって動いた原子核が鉱物の方へ移動することによるARTの形成を試みる。本研究では, ^{241}Am 線源 (300Bq) と ^{252}Cf 線源 (約100Bqと1kBq) の3種類を使用した。 ^{252}Cf の約100Bqの線源は, 1kBqの線源の蓋に ^{252}Cf が付着していたのでそれを線源として利用したものである。照射実験は京都大学複合原子力科学研究所で行った。様々な照射時間で試料表面の状態変化を観察した (表1)。今回は照射試料として白雲母を用いた。白雲母は劈開面を観察することにより, ノイズや研磨の影響を考慮する必要がなく, エッチングによりARTを大きくすることができるため, 顕微鏡で容易にARTを観察することができる (Gogen and Wagner, 2000)。

3. 結果と考察

3.1. ^{241}Am 線源の照射

各照射時間における試料表面の画像を図1に示す。画像を比較すると照射時間の増加に伴ってART数が増加している。しかし, 2日以降の

照射は形成されたARTが重複することにより計数がうまくできなかつた。そのため、ImageJを用いて画像を二値化しARTに対応するピクセル数を比較した (図2)。図2より照射時間の増加と共にピクセル数も増加傾向であることが分かる。傾きの減少はARTの重複によるものであると考えられる。正確な計数結果を得るためにはARTの重複が起こらない半日が限界であるため、今後は照射時間を減らして観察を行っていく必要がある。

3.2. ^{252}Cf 線源の照射

1kBqの線源で照射した結果を図3に、約100Bqの線源で照射した結果を図4に示す。図3より、試料表面にはARTとFTの両方が形成されていることが分かる。しかし、5-10分の短時間照射でも形成されたART数が多く、照射時間によるARTの増減を比較することができなかつた。1kBqより弱い線源である約100Bqの線源で照射した結果 (図4)、赤丸で囲った5つの部分にFTが密集しており、均質な線源ではないことが確認できた。不均質な線源である理由として、1kBqの ^{252}Cf が自発核分裂を起こすことにより放射性元素がランダムな方向へ飛

ばされるためであると考えられる。以上のことから、 ^{252}Cf 線源を用いる際は1kBqより弱く均質な線源を用いることが望ましいと言える。しかし、 ^{252}Cf はARTだけでなくFTも形成することを考慮すると自発核分裂を行わないアメリカウム線源を用いての照射が好ましい。

文献

- K. Goegn and G.A. Wagner, 2000, Alpha-recoil track dating of Quaternary volcanics. *Chemical Geology*, 166, 127-137
- T. Hashimoto, H. Sugiyama and T. Sotobayashi, 1980, Alpha-recoil track formation on muscovite and measurement of recoil-range using ^{252}Cf -sources. *Nuclear Tracks*, 4, 263-269
- U.A. Glasmacher, M. Lang, S. Klemme, B. Monie, L. Barbero, R. Neumann, and G.A. Wagner, 2003, Alpha-recoil tracks in natural dark mica: Dating geological samples by optical and scanning force microscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 209, 351-356

表1. 使用した線源と照射時間の種類

使用した線源	アメリカウム(Am)	カリホルニウム(Cf)
放射能	300Bq	1kBq 100Bq
照射期間	半日 2日 4日 1週間	5分 10分 1時間
エッチング	32 $^{\circ}$ CHF 2時間	32 $^{\circ}$ CHF 5分(FT)と2時間(ART)

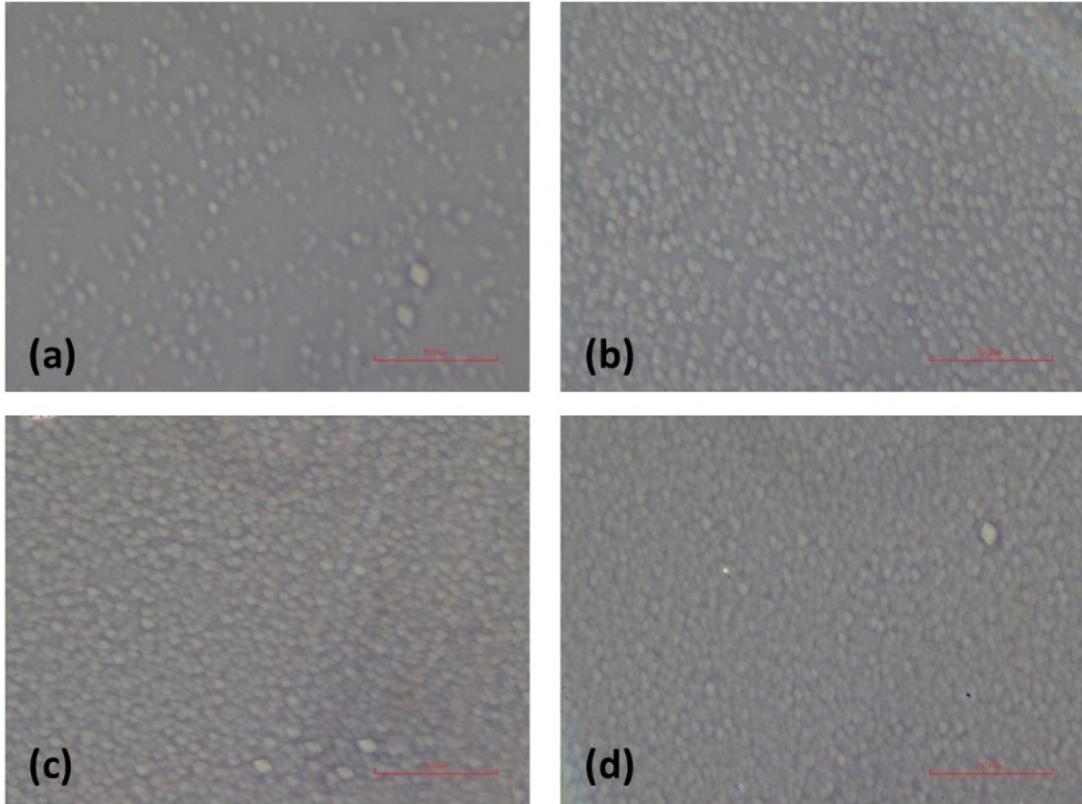


図1. 各照射時間における試料表面の観察結果.
 (a)半日照射：(b)2日照射：(c)4日照射：(d)1週間照射

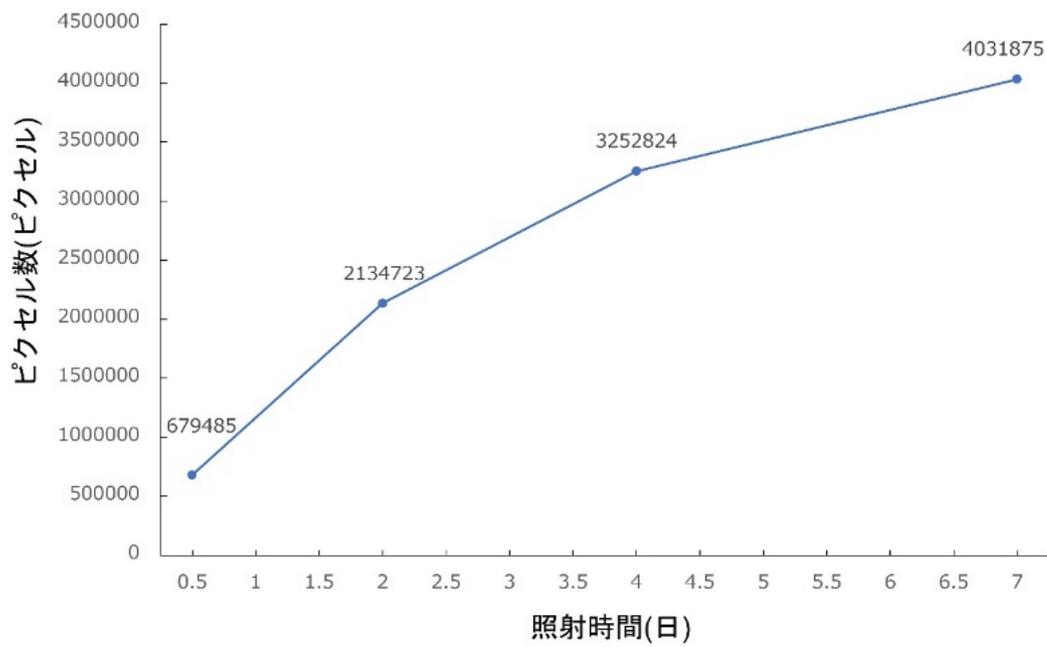


図2. ^{241}Am 線源の照射時間とピクセル数.

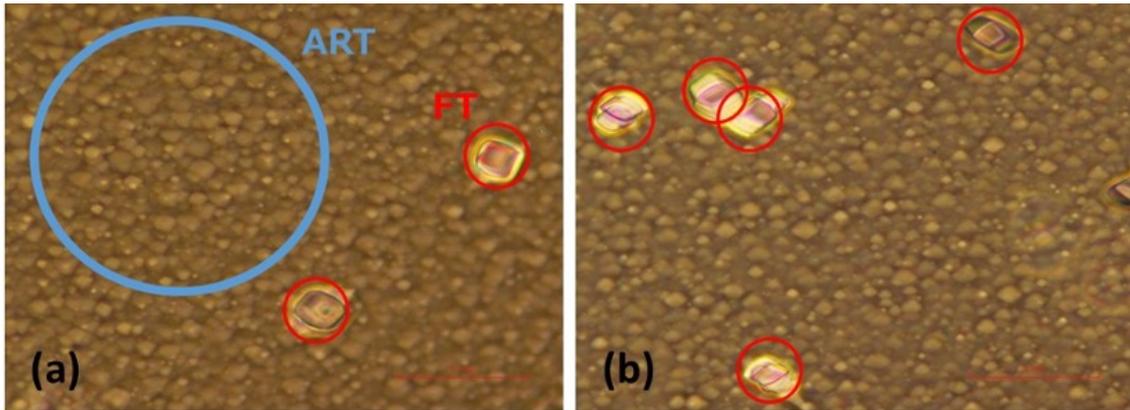


図3. ^{252}Cf 線源(1kBq)の照射結果.
 (a)5分照射 : (b)10分照射

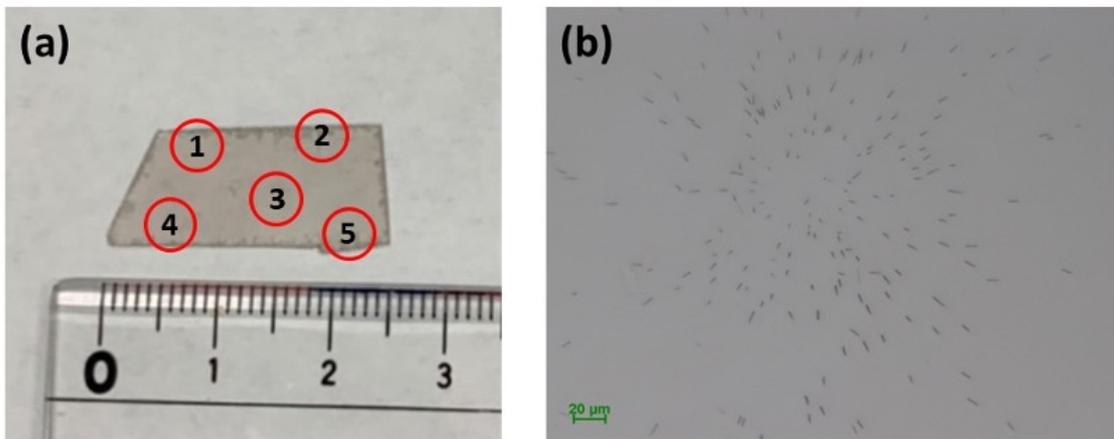


図4. ^{252}Cf 線源(100Bq)の照射結果.
 (a)100Bq照射後のFT密集エリア : (b)エリア3の拡大図

バデリアイトのフィッション・トラック年代測定に向けて：
エッチング実験の結果とその考察

中嶋 徹*・福田 将真*・長田 充弘*・檀原 徹**・
岩野 英樹**・末岡 茂*

Toward fission-track dating of baddeleyite:
first reports and discussions on etching experiments

Toru Nakajima*, Shoma Fukuda*, Mitsuhiro Nagata*, Tohru Danhara**,
Hideki Iwano** and Shigeru Sueoka*

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

** (株)京都フィッション・トラック, Kyoto Fission-Track Co., Ltd.

はじめに

バデリアイト (baddeleyite, ZrO_2) はジルコンと並び天然に産出するジルコニウム鉱物の一種である。バデリアイトは SiO_2 に不飽和な岩石に主に産出することから、一部のアルカリ火成岩やスカルン鉱床の年代測定に用いられており、U-Pb年代測定が実用化されている (Heaman & LeCheminant, 1993) ほか、(U-Th)/He年代測定の適用例も報告がある (Metcalf & Flowers, 2013)。バデリアイトのフィッション・トラック (FT) 年代測定に成功すれば、これまで年代測定が難しかったアルカリ火成岩の熱史の復元に資することができる。本論ではバデリアイトFT年代測定の実用化に向け行ったFTエッチング実験の結果と、その簡単な考察を行う。

檀原ほか (1999) は、複数種の試薬を用いてバデリアイトのFTのエッチング実験を行った。その結果、研磨痕の拡大が観察される一方で、自発、誘導FTは観察されなかったと報告している。本研究では、檀原ほか (1999) で用いられたものと同一試料のバデリアイト (U.S.S.R: 第一稀元素化学工業提供試料) を使用した。檀原ほか (1999) は当試料のU-Pb年代を約1.5 Ga, ウラン濃度を約150 ppmと報告している。

NaOH-KOH混合溶液を用いた実験

バデリアイトをハンドピッキング後、テフロンシートに埋め込み、ダイヤモンドペーストを用いて表面を研磨した。NaOH-KOH混合溶液を用いて、228°Cの温度条件で段階的にエッチングを行い、反射像と透過像をそれぞれ観察した。

観察結果された反射像と透過像を図1に示す。エッチング時間3時間で研磨痕の出現が確認され、その後6時間、12時間で研磨痕の更なる拡大と、表面の粗面化が観察された。一方、FTと思しき線状の組織は観察されなかった。

HF溶液を用いた実験

上記の手順でマウントを作成し、40% HF溶液を用いて20°Cの温度条件で段階的にエッチングを行い、反射像と透過像をそれぞれ観察した。

観察結果された反射像と透過像を図2に示す。0.5時間時点で研磨痕の出現が観察され、その後、2時間、20時間で研磨痕の更なる拡大が観察された。一方、FTと思しき線状の組織は観察されなかった。

考察

2種類の試薬を用いたエッチング実験では研磨痕の拡大が観察されたことから、バデリアイトがこれらの試薬によりエッチングされたこと

が確認された。一方、それぞれの実験においてFTと思しき線状の組織は観察されなかった。FTが観察されなかった原因として、①FT密度が極端に低い、②FTが実験中に熱アニールされている、③何らかの理由でバデリアイトのFTが選択的にエッチングされづらい、等が予想される。①については、使用した試料のウラン濃度の報告値 (150 ppm: 檀原ほか, 1999) を考慮すると、FT密度が極端に低い可能性は考えにくい。また②については、HFを用いた室温での実験においてもFTが観察されなかったことから、熱アニールによりFTがリセットされている可能性も低い。

③に関連する先行研究として、バデリアイトのFTを観察したO'Connell et al. (2020) がある。この研究ではTEM観察により、XeイオントラックがアパタイトやジルコンのFTのようなアモルファス化した領域としてではなく、単斜晶系から正方晶系への線状相転移領域 (約2.5 nm幅)として認定されることを報告している。そのため、本研究でFTがエッチングされなかったことは、バデリアイトのFTがアモルファス化しておらず、エッチングされにくいことが原因として考えられる。また、バデリアイトの単斜晶と

正方晶の薬品耐性に差がなければ、試薬を用いてFTを選択的にエッチングすることは困難であると予想される。

以上を踏まえると、ジルコンと同様の方法でのバデリアイトFTのエッチングは困難であると予想されるが、TEMやAFMによるlatent trackの観察などFT密度を計測することができれば、熱年代計として使用できる可能性がある。今後もバデリアイト FT法の確立へ向けて可能性を探ってゆく。

文献

- 檀原 徹, 岩野 英樹, 吉岡 哲, (1999). フィッション・トラックニュースレター, 12, 45.
- Heaman, L.M., LeCheminant, A.N. (1993). *Chemical Geology*, 110, 95–126.
- Metcalf, J. R., Flowers, R. M. (2013). In *Geological Society of America Abstracts with Programs*, 45, 223.
- O'Connell, J. H., Lee, M. E., Skuratov, V. A., Rymzhanov, R. A. (2020). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 473,1–5.

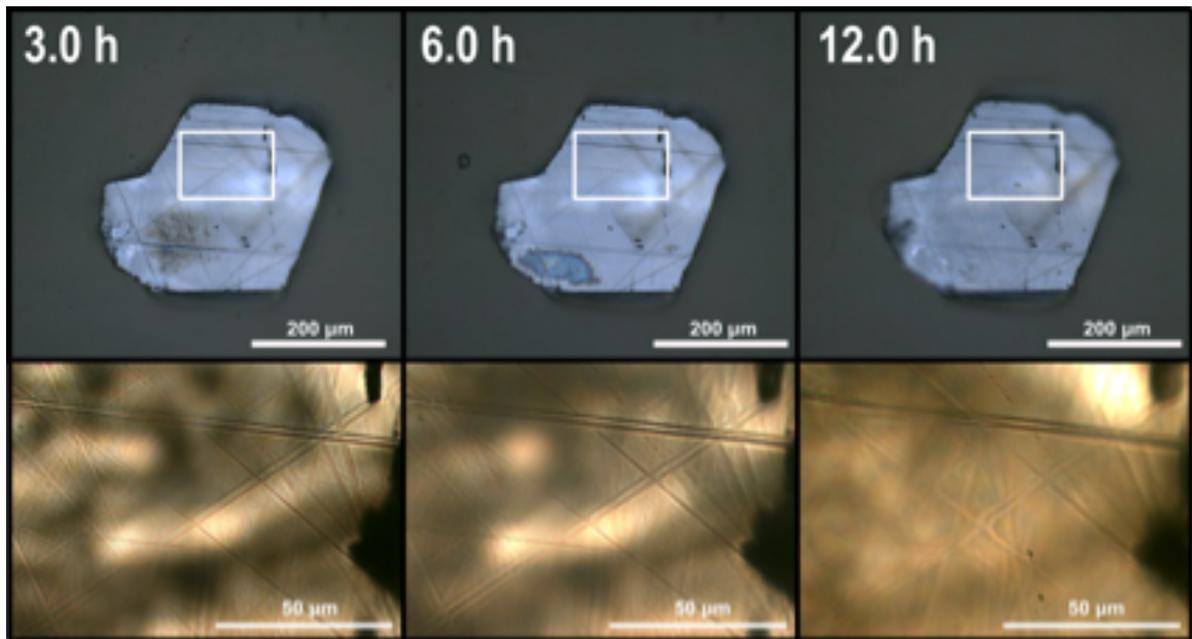


図1. NaOH-KOH混合溶液によりエッチングされたバドリアイトの反射像(上)と拡大領域の透過像(下). 研磨痕が徐々に拡大してゆく様子が見られる.

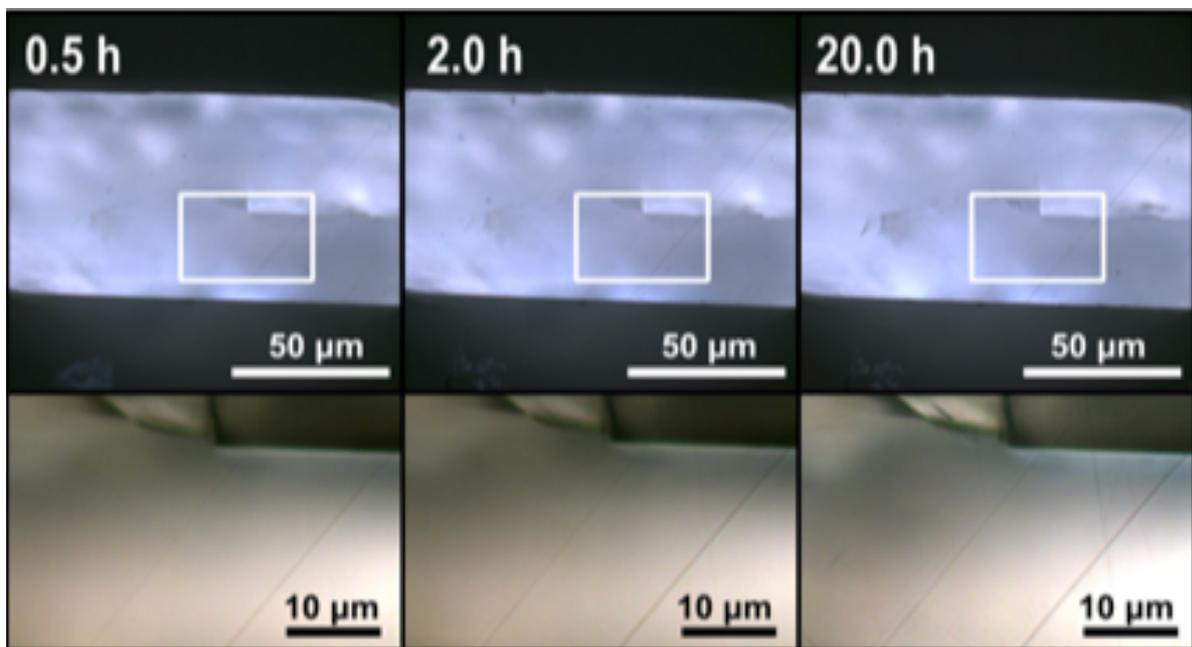


図2. HF溶液(40%)によりエッチングされたバドリアイトの反射像(上)と拡大領域の透過像(下). NaOH-KOH混合溶液と同様に研磨痕が徐々に拡大してゆく様子が見られる.

有孔虫の熱ルミネッセンス測定

品田遥可*・佐川拓也*・濱田麻希*・長谷部徳子**

Thermoluminescence measurement emitted from foraminifera

Haruka Shinada*, Takuya Sagawa*, Maki Hamada*
and Noriko Hasebe**

* 金沢大学理工学域地球社会基盤学類, Department of Earth Sciences, Kanazawa University

** 金沢大学環日本海域環境研究センター, Institute of Nature and Environmental Technology, Kanazawa University

はじめに

有孔虫は、酸素同位体分析により、氷期・氷期サイクルに代表される地球の気候変動の研究に貢献する微化石である。有孔虫の年代測定は、数万年前までの年代範囲では¹⁴C年代測定で決定されている (Missiaen et al., 2020)。それより古くなると、例えば海洋堆積物コアなど連続的に試料をいられる対象に含まれる有孔虫の酸素同位体比を調べ、年代値のわかっている有孔虫の酸素同位体比と相対的に照らし合わせて年代が類推されている (松井ほか, 2020)。酸素同位体比曲線が連続的に得られなかった場合、酸素同位体比のどの部分と対比できるかの判断が難しくなり、正確な対比が難しい場合がある。この数万年から数百万年の範囲に、直接有孔虫の年代決定が可能であれば、より詳細な化石層序を確立でき、第四紀の環境変動研究に貢献できる。本研究では有孔虫の直接の年代決定を目指し、熱ルミネッセンス (Thermoluminescence: TL) 年代測定が可能かどうか吟味した (Ogata et al., 2017)。TL年代測定は、加熱時の試料からの発光量が環境放射線による蓄積線量に比例することを利用する手法である。放射性元素が乏しい試料でも年代測定が可能であり、その適用可能年代測定幅より、数百万年前の試料まで対象とすることができる。試料の量が少なくても測定できるので、有孔虫単体を直接測定できる可能性もある。

分析試料

星の砂として販売されている有孔虫から、*Calcarina* sp.と*Baculogypsina sphaerulata*をとりだし人工的に γ 線照射を行い、TLの特徴を調べた。また熱帯太平洋域で採集した海洋コアから採取された炭酸塩軟泥から有孔虫をテスト測定に処した。

分析結果

発光色を撮影したところ、赤く発光した (図1)。またXRDによる鉱物種の同定を行なったところ、分析した有孔虫殻は方解石であった (図2)。単個体でのTL測定をしたところ、人工的に放射線を与えた場合低温側120°Cと高温側320°Cに発光のピークがあった (図3)。しかし天然の残存TLには低温側のシグナルは残っていなかった。有孔虫単体でも複数個体でもTLグローブに大きな変化はなかった。また有孔虫を粉末にして分析すると、表面積の増加と温度の伝わりやすさにより、シグナル強度が上昇し、とくに高温側の発光ピークの温度がやや低下した。X線を照射した後1週間おいてから測定したところ (図4)、低温側のシグナルは残っていなかった。高温側のシグナルは発光温度がやや高温にシフトしシグナル強度がやや減少した。高温側のシグナルを利用して見かけの蓄積線量を求めることができた。

これらの結果に基づき、海洋コア試料より分

離した複数個の有孔虫を粉末状にしてTL測定を行ったところ、約160Gyの蓄積線量と見積もることができた(図5)。しかしこの見積もりはシグナルが減衰することを考慮していないため、実際は倍以上の線量が当たっていたのではと考えられる。

結論

有孔虫は赤色のTLを示し、この波長域のルミネッセンスを測定することによって蓄積線量の見積もりが可能である。発光は約100°Cと約300°Cに求められるが、低温側のシグナルは天然試料では観察されず不安定なものと考えられる。時代が同じ試料であれば複数個を合わせて測定しても問題なく、また粉末にしたほうがシグナル強度がより高くなり、信頼性のある測定結果を得られる。しかし時間が経つとシグナルが減衰するので、今後その特徴を明らかにしないと、実際の年代測定に利用できるかどうかを判断できない。

謝辞：ガンマ線照射は京都大学複合原子力科学研究所の共同利用制度を利用して行った。照射は飯沼勇人氏にご協力いただいた。

文献

- 松井浩紀, 池原 実, 堀川恵司, 岡崎裕典 (2020) 九州・パラオ海嶺の海洋コア年代測定～安定同位体比によるアプローチ～, *Isotope News*, No.770, 8月号.
- Missiaen, L., Wacker, L., Lougheed, B.C., Skinner, L., Hajdas, I., Nouet, J., Pichat, S., Waelbroeck, C. (2020) Radiocarbon dating of small-sized foraminifer samples: insights into marine sediment mixing. *Radiocarbon*, 62, 313–333.
- Ogata, M., Hasebe, N., Fujii, N., Yamakawa, M. (2017) Measuring apparent dose rate factors using beta and gamma rays, and alpha efficiency for precise thermoluminescence dating of calcite. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 112, 336–345.

本稿の内容は、金沢大学環日本海域研究センター令和三年度年報(2021, 80-83)にも掲載されている。

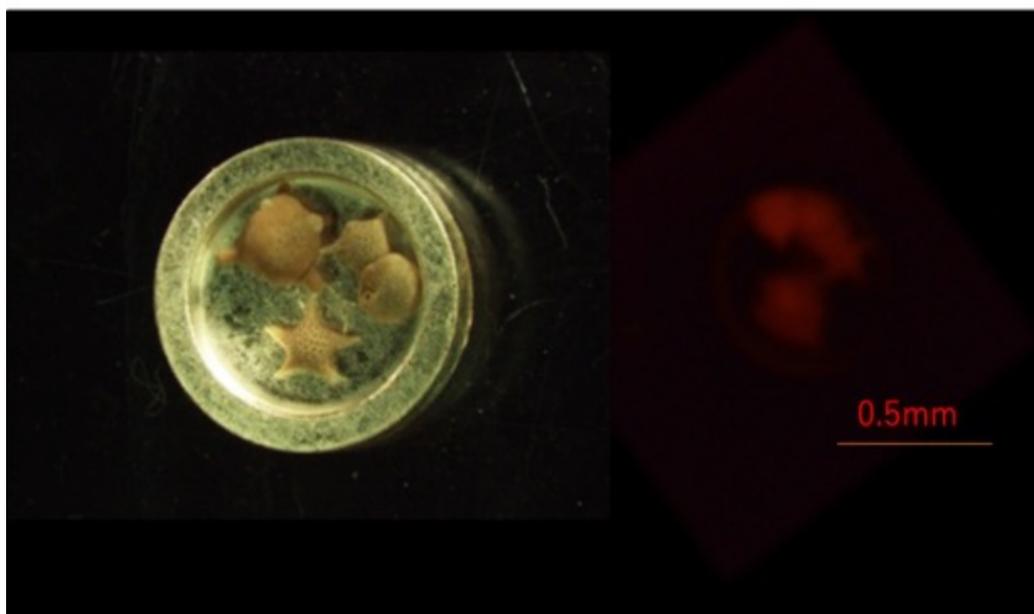


図1. 星の砂から分取した有孔虫と発光色

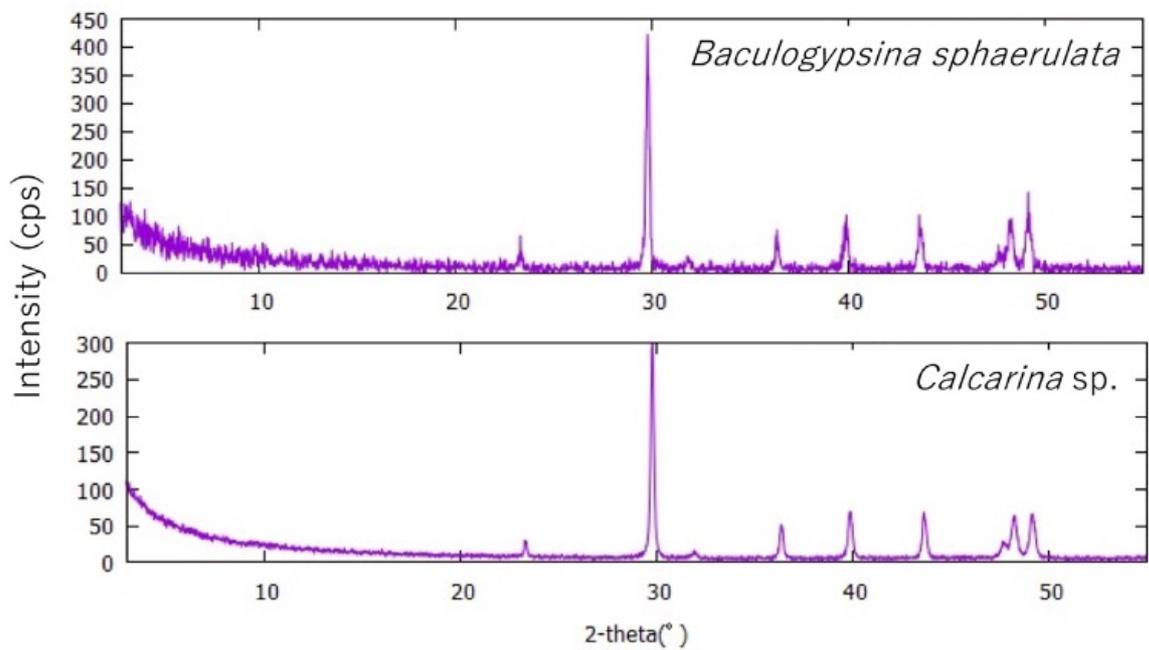
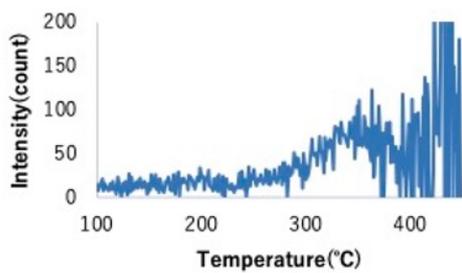
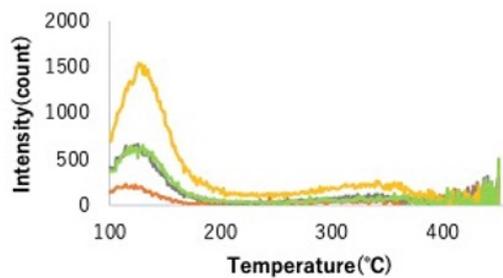


図2. 有孔虫のXRDデータ



天然の放射線由来のTL



人工照射(X線照射)由来のTL
グラフの色の違いは線量の違いによる

図3. 有孔虫のルミネッセンス測定結果

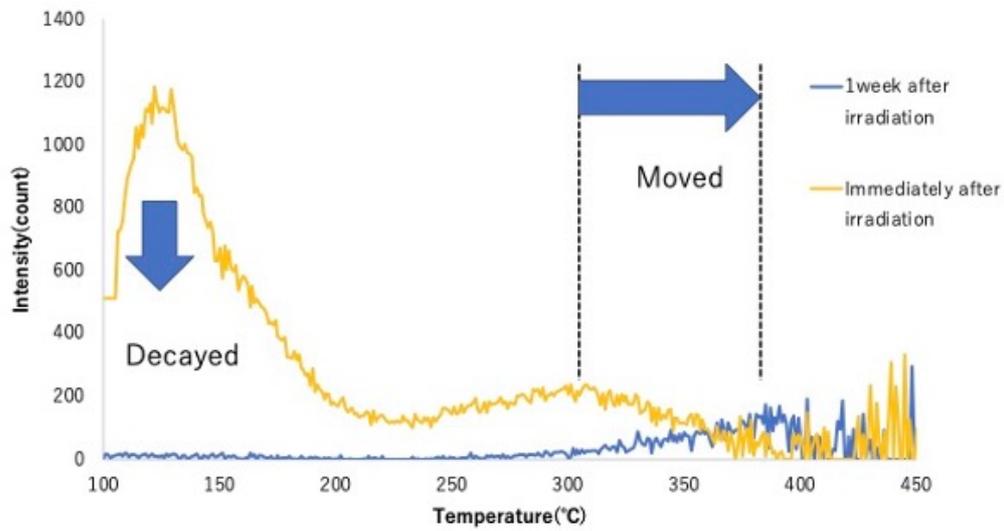


図4. 放射線照射のち測定までに時間を起した時のシグナルの減衰

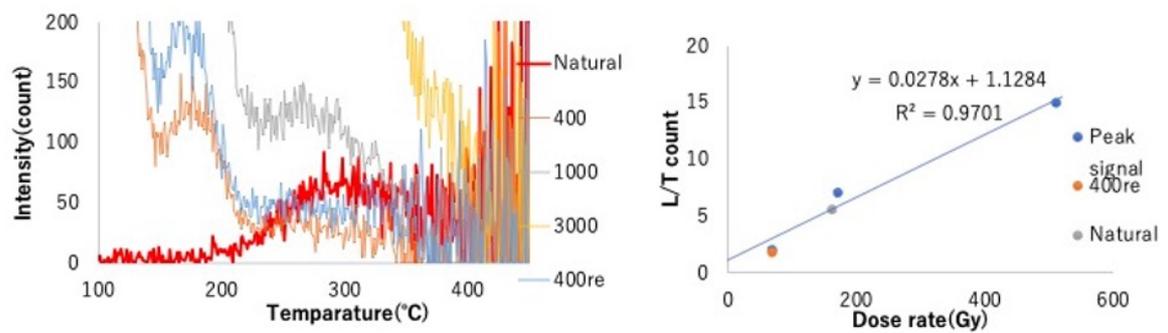


図5. 海洋底堆積物コアから分離した有孔虫の測定結果

第 46 回日本フィッション・トラック研究会実施報告

伊藤久敏

第 46 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、2022 年 2 月 21 日 (月) の全日と 22 日 (火) の午前に、Zoom を用いたオンラインにて開催されました。金沢大学の「しいのき迎賓館」での現地とオンラインのハイブリッド方式で開催すべく、新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) の感染状況を注視していましたが、開催一週間前でもオミクロン株の感染状況が収まらなかったため、昨年引き続き、完全オンラインでの開催となってしまいました。

合計 25 件の発表があり、セッションを 5 つに分け、発表会が行われました。全ての発表を紹介することは困難なので、ここでは、私の独断でいくつかの発表を紹介します。FT 法に関する発表としては、アパタイトの FT 法の適用に関する発表が 2 件ありました (発表番号④、⑤)。いずれも、中国・四国地方を対象としており、この地域の削剥・上昇史の理解が深まることが期待されます。また、バデリアイト (ZrO_2) のエッチングに関する発表がありました (②)。通常のエッチングではトラックが観察されず、その原因としてアモルファスな領域が生じていないことが考えるとのことでした。さらに、アルファリコイルトラックに関する発表 (③) では、人工線源によるアルファリコイルトラックを白雲母上で観察することに成功したことが報告され、ジルコンでの適用に一步近づいたとの感想を持ちました。

(U-Th)/He 法 (He 法) は、現在、原子力機構において、我が国で唯一、研究が行われていますが、今回は、ジルコンの融解に関する発表 (⑦)、年代標準試料に関する発表 (⑧) 等がありました。また、ジルコンの U-Pb 法の適用に関する発表が 4 件 (⑨、⑪、⑬、⑭)、U-Pb 法、FT 法、He 法等のマルチ年代測定に関する発表が 3 件 (①、⑥、⑩) ありました。

ルミネッセンスに関する発表は 6 件 (⑬、⑰、⑲、⑳、㉑、㉒)、ESR に関する発表は 3 件 (㉓、㉔、㉕) でした。その他、角閃石の圧力計に関する発表 (⑫)、 ^{210}Pb を用いた堆積年代に関する発表 (⑮)、月面での水を分析する装置の開発に関する発表 (⑱) などの刺激的な発表がありました。

参加者人数は、Zoom のカウント数から 41 名でした。研究会終了時には、Zoom 上で記念写真を撮り、次回は現地で直接会えることを望みながら閉会となりました。最後になりますが、今回、会場の確保や Zoom のホスト等で金沢大学の長谷部徳子会員には大変お世話になりました。ここに改めてお礼申し上げます。



合同研究発表会プログラム

オンライン

2022年2月21日（月）

	9:20	開会挨拶) 長谷部徳子	
セッション1: FT etc		pdf no.	座長) 田上高広
	9:30	1	末岡 茂 (原子力機構) 低温熱年代学に基づくスラブ起源流体活動に伴う熱異常検出の試み
	9:50	2	中嶋 徹 (原子力機構) バデリアイトのフィッシュン・トラック年代測定に向けて: エッチング実験の結果とその考察
	10:10	3	中島大輝 (金沢大) Am線源, Cf線源を利用したアルファリコイルトラックの形成実験
	10:30	4	岡本 晃 (京都大) 四国山地における中新世花崗岩類のアパタイトフィッシュン・トラック年代速報
	10:50	5	大平寛人 (島根大) 島根県奥出雲町周辺の真砂に含まれるアパタイトのFT年代
	11:10	6	梶田侑弥 (京都大) 北上山地における熱年代学データの解釈
	11:30	休憩	
セッション2: He・U-Pb etc		座長) 大平寛人	
	13:00	7	福田将真 (原子力機構) (U-Th)/He法における高温加圧酸分解によるジルコンの完全溶解の試み
	13:20	8	福田将真 (原子力機構) ジルコン(U-Th)/He法の年代標準試料の探求(続報): 複数のジルコン試料における年代学的検討
	13:40	9	長田充弘 (原子力機構) 照来層群歌長流紋岩から得られたジルコンU-Pb年代
	14:00	10	南 沙樹 (京都大) 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
	14:20	11	伊藤久敏 (電中研) 滝谷花崗閃緑岩: 傾動隆起した岩体それとも再生プルトン?
	14:40	12	中嶋 徹 (原子力機構) Ai-in-hornblende地質圧力計を用いた削剥史の制約: 太平山複合プルトンへの適用
	15:00	休憩	
セッション3: U-Pb・ルミ etc		座長) 末岡 茂	
	15:20	13	岡本彩香 (千葉大) 東北日本南部北上帯に分布する高圧変成岩類の岩石学とジルコンU-Pb年代: 古東アジア大陸縁辺の古生代テクトニクスへの制約
	15:40	14	橋本昭平 (千葉大) ジルコンU-Pb年代と地球化学的特徴に基づいた舞鶴帯形成過程の検討—南中国地塊東縁におけるベルム紀背弧拡大の証拠—
	16:00	15	Shuukhaaz Ganbat (金沢大) ²¹⁰ Pb dating result of lacustrine sediment: Tsagaan lake in Valley of the Gobi Lakes in Mongolia
	16:20	16	品田遥可 (金沢大) 有孔虫の熱ルミネッセンス測定
	16:40	17	小形 学 (原子力機構) 大深度ポーリングコアを利用したmulti-OSL熱年代法による地殻浅部の古地温構造の復元: 東濃地域における事例
	17:00	18	山中千博 (大阪大) 超小型レーザー同位体分析計
	17:20	休憩	
	17:40	フィッシュン・トラック研究会総会	

2022年2月22日（火）

セッション4: ルミ etc

		座長) 谷 篤史	
	9:00	19	林崎 涼 (電中研) フェーディング率と測定方法の関係
	9:20	20	田村 亨 (産総研) 東南極Langhovdeにおける海岸堆積物のルミネッセンス特性
	9:40	21	小森康太郎 (東京大) 九十九里浜現世海浜堆積物におけるIRSLとpIRSLの残存線量
	10:00	22	高田将志 (奈良女子大) 各種鉱物のLM OSL信号特性
	10:20	休憩	

セッション5: ESR etc

		座長) 山中千博	
	10:40	23	豊田 新 (岡山理科大) 信号再生法を用いた重晶石のESR年代測定の試み
	11:00	24	小畑直也 (岡山理科大) 熱安定性を考慮したテフラ試料の総被曝線量評価
	11:20	25	谷 篤史 (神戸大) 千葉石に含まれる有機ラジカルを用いたESR年代測定の試み
	11:40	閉会挨拶) 伊藤久敏	

第 46 回日本フィッション・トラック研究会総会実施報告

伊藤久敏

第 46 回日本フィッション・トラック (FT) 研究会総会は、2022 年 2 月 21 日 (月) 17:10 ~17:30 にオンラインにて、以下の内容で実施されました (以下、敬称略)。

1. 出席会員数の確認： 普通会員 16 名の出席と委任状 12 名分が得られたことから、普通会員 (66 名) の 1/5 以上の出席および委任状をもって、総会は成立することを確認した。
2. 今年度の活動報告： ①FTNL 第 34 号の Web 公開と発刊, ②第 46 回 FT 研究会 (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) の開催, ③FT 研究会の HP の更新, ④国際会議の状況 (Thermo2021 Santa Fe 大会, Thermo2025 金沢大会の招致) を報告した。また、2 名の新入会員 (石川法人, 長田充弘: ともに原子力機構) を報告した。
3. 2020 年度の会計報告 & 会計監査報告： 2020 年度の収入は繰越金 (571,838 円) を含め、631,842 円、支出は 51,508 円であり、差額の 580,334 円を次年度に繰り越すことが報告され、監査報告 (今回は Zoom 上での領収書開示で対応) とともに承認された。
4. 次年度の執行部体制： 次年度 (2022 年度) の執行部は、会長として、伊藤久敏 (電中研) から大平寛人 (島根大) へ、委員 (庶務) として、山田隆二 (防災科研) から伊藤久敏 (電中研) へ、檀原有吾 (京都 FT) から福田将真 (原子力機構) への交代が承認された。他の委員は留任することが承認された。
5. 次年度の活動計画： 以下の活動計画が承認された。①FTNL 第 35 号は 2022 年 10 月発行に向けて活動する、②第 47 回 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合同で開催する。なお、開催時期は、11 月下旬頃が良いとの意見があった。開催地としては、コロナが落ち着けば、徳島大が引き受け可能とのことが紹介された。

総会出席者 (16 名: 五十音順) :

伊藤久敏, 大平寛人, 小形 学, 岡本 晃, 梶田侑弥, 末岡 茂, 田上高広, 谷 篤史,
田村明弘, 中嶋 徹, 長田充弘, 長谷部徳子, 福田将真, 南 沙樹, 村松敏雄, 山中千博

委任状提出者 (12 名: 五十音順) :

安間 了, 猪又 竜, 岩野英樹, 雁沢好博, 白井香奈江, 竹内圭史, 檀原 徹, 檀原有吾,
林 広樹, 藤原 寛, 松浦秀治, 山崎誠子

フィッション・トラックニュースレター

第35号 冊子版 (2022)

発行日 2022年12月31日

編集 田村明弘 (aking826@staff.kanazawa-u.ac.jp)

〒920-1192 石川県金沢市角間町

金沢大学 理工学域 地球学教室

発行 日本フィッション・トラック研究会

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

研究会問い合わせ先

大平寛人 (ohira@riko.shimane-u.ac.jp)

〒690-8504 島根県松江市西川津町1060

島根大学総合理工学部地球科学科
