

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.

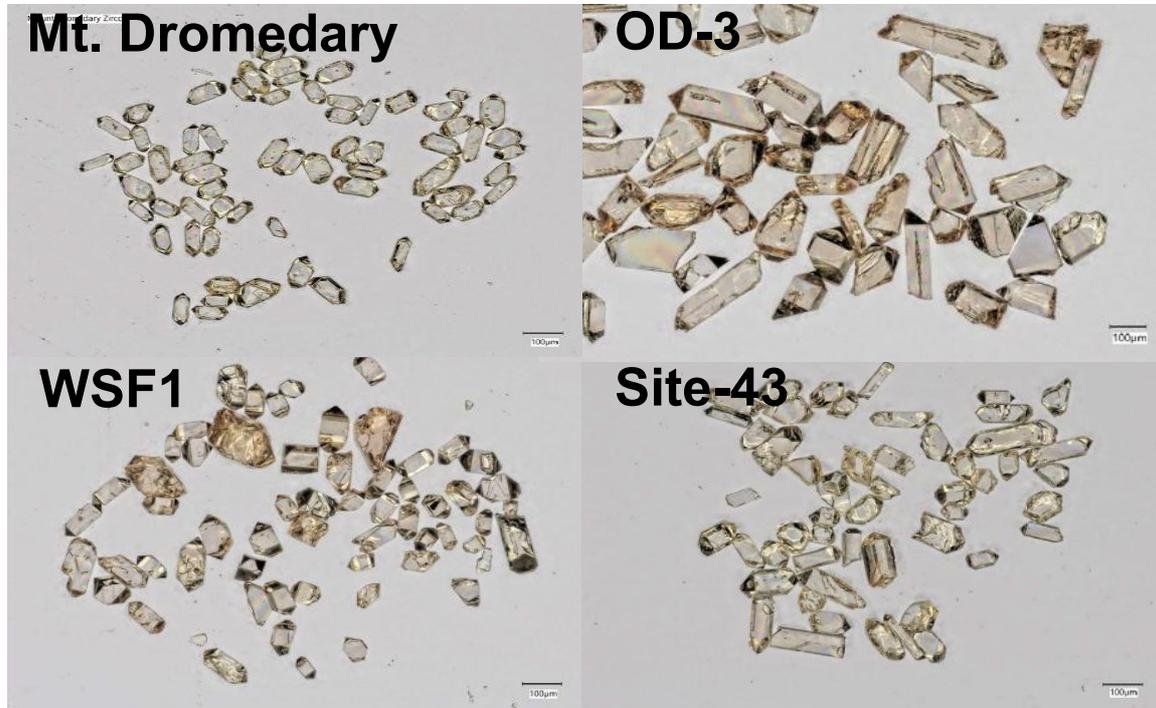


図1. 本研究でZHe年代分析を実施した4つのジルコン試料。右下のスケールバーは100 μm。

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