

熱史からみたジルコンの標準試料への適性評価：石川県鷺走ヶ岳層の例

長田充弘*・中嶋 徹*・福田将真*・末岡 茂*・八木公史**・横山立憲*

Evaluation of suitability of zircon as standard materials based on thermal history:
example of the Wassogatake Formation in Ishikawa Prefecture

Mitsuhiro Nagata*, Toru Nakajima*, Shoma Fukuda*,
Shigeru Sueoka*, Koshi Yagi** and Tatsunori Yokoyama**

* 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, Japan Atomic Energy Agency

** 株式会社蒜山地質年代学研究所, Hiruzen Institute for Geology & Chronology

はじめに

ジルコンの年代測定（例えば、U-Pb法、フィッション・トラック法（以下FT法）、(U-Th)/He法など）は近年盛んに行われており、元素組成情報を組み合わせることにより、晶出温度に関するデータなども取得できるようになった（例えば、Yuguchi et al., 2020）。また、複数の化学（元素・同位体組成）情報を同時に同一スポットの分析から取得する手法（LASS）が開発されてきた（例えば、Iwano et al., 2020）。こうした近年の動向から、著者らは複数の分析に適応したジルコン標準試料の探求を行っている（例えば、長田ほか、2021, 2022；福田ほか、2022）。

本研究では、石川県白山市に分布する鷺走ヶ岳月長石流紋岩質溶結凝灰岩を対象として、各種分析を行い、熱年代的観点からその有用性を評価した。また、鷺走ヶ岳月長石流紋岩質溶結凝灰岩のような月長石を含む火砕岩は、日本海拡大の早期に生じたリフティングイベントに関連が指摘されてきた重要な地質単位であり、その岩相、化学組成、年代、古地磁気などあらゆる観点から研究されてきた（石田ほか、1998；伊藤ほか、2001；Ayalew and Ishiwatari, 2011）。そのため、本研究で得られた年代から周辺の地質単位との年代学的対比も行い、その地質学的意義にも言及する。尚、鷺走ヶ岳月長石流紋岩質溶結凝灰岩（Mt. Wasso moonstone rhyolitic welded tuff；模

式地：鷺走ヶ岳北側山腹の鷺走ヶ岳林道沿いと
その下の谷筋）は石田ほか（1998）により提唱されたが、その名称に関する定義は、International Stratigraphy Guideなどの提唱規範に反する。本論では、地質分布などは石田ほか（1998）に従うものの、名称のみ鷺走ヶ岳層（Wassogatake Formation）と改める。

地質概略と採取試料

鷺走ヶ岳層は飛驒帯を構成する深成岩類や変成岩類および下部白亜系手取層群を基盤として、北陸地域に広く分布する中新統八尾層群（中嶋ほか、2019）相当に覆われる（図1）。鷺走ヶ岳層は主に弱溶結～強溶結凝灰岩からなり、北陸地域に分布する南砺層群（山田ほか、2023；例えば、城端層（旧来の刀利層）白中溶結凝灰岩部層、西谷層など）相当として認識されてきた。鷺走ヶ岳層からは 19.5 ± 0.6 Maもしくは 21.4 ± 1.9 MaのRb-Sr全岩アイソクロン年代（石田ほか、1998）、 $21.6\text{--}20.0$ MaのジルコンFT年代（伊藤ほか、2001）、および 17.77 ± 1.05 Maのジルコン(U-Th)/He年代が得られている（福田ほか、2022）。

試料は石川県白山市左礫町りの林道沿いの露頭から3試料採取した。これらの地点は伊藤ほか（2001）でジルコンFT年代測定が行われた地点（WSF01）に近い。以下では、それら3試料をそれぞれNFS-1, 3a, および3bと呼んで区別する。いずれの試料の構成鉱物に大きな違

いはないが、3aは相対的に強く溶結しており、3bはやや変質している。尚、3試料のジルコンはいずれもシャープな自形を呈し、カソード・ルミネッセンス (CL) 像ではほとんどのものにコアやリムといった構造は基本的に認められないが、3bについてはCL像において暗いコアを持つジルコンも確認される。

年代測定手法

ジルコンU-Pb年代：樹脂包埋したNFS-1、3a、および3bのジルコンについて、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製; JXA-8530F) を用いて、CL像の観察をおこなった。同センター設置のレーザーアブレーション (Photon Machines 製Analyte G2) を接続したマルチコレクター誘導結合プラズマ質量分析装置 (Neptune-Plus) を用いてU-Pb同位体分析を行った。分析条件などは原田ほか (2023)、中嶋ほか (2023) と同様に、91500ジルコン (Wiedenbeck et al., 1995) を標準試料として挟み込み法により各種同位体補正を行い、それらの補正の確認として、未知試料と共にOD-3ジルコン (Iwano et al., 2013; 参照値 33.0 ± 0.1 Ma) を測定した。未知試料分析中のOD-3の年代値は参照値と整合的であった。

ジルコンFT年代：同センター設置の (Zeiss 製Track Scan) を用いて、FTの数、密度、および長さを計測した。ジルコン中のウラン (U) 濃度については、同センターのレーザーアブレーション (Photon Machines 製Analyte G2) を接続した誘導結合プラズマ質量分析装置 (Agilent Technologies 製Agilent7700) を用いた。

サニディンK-Ar年代：サニディンの分離・濃集は八木 (2006) に従って、磁力選鉱および重液選鉱により行った。岡山理科大学設置の日立製作所製180-30型原子吸光・炎光分光分析装置を用いて、カリウム (K) の定量を行った。アルゴン (Ar) 同位体比の測定は、岡山理科大学設置の希ガス質量分析計 (装置名：

HIRU) を用いた。Kの定量については長尾ほか (1984) を、Ar同位体比分析については、Itaya et al. (1991)を参照されたい。

測定結果

ジルコンU-Pb年代：NFS-1、3a、および3bいずれの試料も23.0–20.6 Maの $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代が得られ、これらの年代は2SD (標準偏差) の不確かさ範囲で重複する。それらのTh/U比は0.88–2.55を示す。NFS-01、3a、および3bより得られた $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年代の加重平均値はそれぞれ 21.75 ± 0.50 Ma, 21.91 ± 0.50 Ma, および 21.79 ± 0.49 Ma (いずれも 2σ) であった。

ジルコンFT年代：NFS-1、3a、および3bより得られた年代はそれぞれ 22.71 ± 4.09 Ma, 21.56 ± 3.09 Ma, および 19.70 ± 2.26 Maであった。また、伊藤ほか (2001) では報告されていなかったFT長に関しては、いずれの試料からも11 μm より短いFT長が複数確認された。

サニディンK-Ar年代：NFS-1、3a、および3bより得られた年代はそれぞれ 20.71 ± 0.46 Ma, 20.77 ± 0.47 Ma, および 20.21 ± 0.45 Maであった。

考察

本研究および先行研究より得られた年代を図2にまとめた。鷲走ヶ岳層は火砕岩主体の地層であるため、以下では、本研究で得られたジルコンU-Pb年代と他の手法で得られた年代値とを比較し、議論する。

ジルコンU-Pb年代については、いずれの試料も測定点の異なる様々な部分を分析したが、全て約22 Maを示すため、年代は均一であると評価できる。ただし、3bのCL像にて暗色コアを分析した点はU濃度がca. 4150 ppmを示し、Th/U比が2.55とやや高い値を示すもあるため、少なくとも3bにはU等の微量元素濃度の不均質は少なからず存在する。ジルコンFT年代については、本研究で得られた年代は伊藤ほ

か（2001）で得られた年代と調和的である。ただし、いずれの試料にも短いFT長が確認されたため、これらの年代が一次的な冷却年代でない可能性があり、鷲走ヶ岳層が何らかの二次的な熱的影響を被ったことを示す。その熱的影響はU-Pb年代とFT年代の閉鎖温度から約300°C以上900°C未満と推定される。石田ほか（1998）は、原因こそ明確に言及していないものの、野外観察と化学分析から鷲走ヶ岳層に元素移動を伴う変質作用があったことを指摘している。サニディンK-Ar年代については、20.7-20.2 Maを示し、本研究で得られたジルコンU-Pb年代と不確かさの範囲で重複せず、若い傾向にあり、寧ろ本研究や伊藤ほか（2001）によって得られたジルコンFT年代と調和的である（図2）。ただし、サニディンK-Ar年代については、若い年代を示すケースも報告されている（McDowell, 1983）。その原因は、サニディンのAr測定において1600°C以上に加熱してもArが完全に脱ガスしきらないことに起因する（McDowell, 1983）。一方、ジルコンFT年代やサニディンK-Ar年代のような閉鎖温度が低い手法においての年代の若化は、安山岩を主とする八尾層群岩稲層の貫入による変質であると考えられる。理由を以下に述べる。1) 試料採取地点より北方約400 mには岩稲層が貫入していること、2) 鷲走ヶ岳層のジルコンから11 μm より短いFT長が確認されたこと、3) 本研究で採取した試料のうち、変質した試料（3b）のジルコンFT年代やサニディンK-Ar年代は不確かさ範囲で重複するものの、他試料のものに比べて若い傾向にあること、4) 福田ほか（2022）によって鷲走ヶ岳層から得られたジルコン(U-Th)/He年代（17.77 $\pm$ 1.05 Ma）と岩稲層のジルコンU-Pb年代（17.6 $\pm$ 0.3 Ma；中嶋ほか，2019）が調和的であることである。

以上の結果は、鷲走ヶ岳層のジルコンが閉鎖温度の高いU-Pb年代に対しては、U-Pb同位体比の標準試料としてある程度評価できるが、閉鎖温度の低いFT年代などには不向きであることを示す。ただし、今後試料採取地点を変える

ことで閉鎖温度の低い測定にも有用な試料が手に入る可能性はある。今後もこれらのジルコンを用いて様々な分析（例えば、Hf同位体など）を行い、標準試料としての適性を評価していく。

また、鷲走ヶ岳層に対比される南砺層群は、主に北陸地域に分布するca. 23-22 Maの礫岩および流紋岩質火砕岩主体層の総称である（山田ほか，2023）。南砺層群からは詳細は公表されていないものの、白中溶結凝灰岩部層からは22.5 $\pm$ 0.5 Maおよび22.8 $\pm$ 0.2 MaのジルコンU-Pb年代が（大田ほか，2018；山田ほか，2023），楡原層の流紋岩礫からは23.6 $\pm$ 0.3 MaのジルコンU-Pb年代が得られている（山田ほか，2023）。これらの年代は鷲走ヶ岳層から得られた年代よりやや古いものもあるが、おおむね本研究の結果と調和的であり、鷲走ヶ岳層が岩相のみならず年代的観点からも南砺層群への対比を裏付ける結果を得た。さらに、このようなca. 23-22 Maの礫岩を含む流紋岩質火砕岩主体層は北陸地域にとどまらず、日本各地の中新統の基底層として存在する。例えば、岩手県の仁左平層（22 Ma；長田ほか，2021），岐阜県の可児層群蜂屋層最下部（22.4 Ma；新正ほか，2018），および兵庫県北但層群高柳層～八鹿層（21.5 Ma；羽地・山路，2019）などがあり、それらが前弧背弧間わず汎日本的に分布するその地質学的背景も今後注目に値する。

謝辞

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。白山市観光文化スポーツ部文化財保護課の大塚健斗氏と左礫町会および鳥越村左礫生産森林組合の皆様には、試料採取に際して、便宜をはかっていただいた。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島田顕臣氏、小北康弘氏、および鏡味沙耶博士には、試料採取にかかる諸手続き、CL撮影、年代測定に際して、ご助力いただいた。京都大学の田上高広教授には、サニ

ディンK-Ar年代について貴重なご意見をいただいた。以上の方々に、深く御礼申し上げる。

文献

- Ayalew and Ishiwatari, 2011. Comparison of rhyolites from continental rift, continental arc and oceanic island arc: Implication for the mechanism of silicic magma generation. *Island Arc*, 20, 78–93.
- 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.
- 羽地・山路, 2019. 兵庫県北部, 中新統北但層群のU-Pb年代とフィッション・トラック年代. *地質学雑誌*, 125, 685–698.
- 原田ほか, 2023. 北部北上山地, 下部白亜系原地山層の流紋岩および凝灰岩のジルコンU-Pb-Hf同位体と全岩化学組成. *地学雑誌*, 132, 57–65.
- 石田ほか, 1998. 新第三系北陸層群の鷲走ヶ岳月長石流紋岩質溶結凝灰岩. *地質学雑誌*, 104, 281–295.
- Itaya et al., 1991. Argon isotope analysis by a newly developed mass spectrometric system for K-Ar dating. *Mineralogical Journal*, 15, 203–221.
- 伊藤ほか, 2001. 石川県に分布する鷲走ヶ岳月長石流紋岩質溶結凝灰岩の古地磁気とフィッション・トラック年代. *地質調査研究報告*, 52, 573–579.
- 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.
- McDowell, F. W., 1983. K-Ar dating: Incomplete extraction of radiogenic argon from alkali feldspar. *Chemical Geology*, 41, 119–126.
- 長尾ほか, 1984. K-Ar法による年代測定. *岡山理科大学蒜山研究所研究報告*, 9, 19–38.
- 長田ほか, 2021. マルチ鉱物年代スタンダードの可能性: 東北日本仁左平層NSTジルコンの予察分析. *日本地球惑星科学連合2021年大会講演要旨*, SGL22-P04.
- 長田ほか, 2022. 照来層群歌長流紋岩から得られたジルコンU-Pb年代. *フィッション・トラック ニュースレター*, 35, 15–18.
- 中嶋ほか, 2019. 富山県八尾地域の新生界年代層序の再検討とテクトニクス. *地質学雑誌*, 125, 483–516.
- 中嶋ほか, 2023. 秋田県太平山複合プルトンから得られたジルコンU-Pb年代. *地質学雑誌*, 129, 503–507.
- 大田ほか, 2019. 富山県西部, 刀利層のジルコン年代と後背地の検討. *日本地質学会第126年学術大会講演要旨*, 421.
- 新正ほか, 2018. 岐阜県可児盆地に分布する蜂屋層最下部柘洞溶結凝灰岩部層のジルコンU-Pb年代. *地質学雑誌*, 125, 483–516.
- 山田ほか, 2023. 西南日本弧富山堆積盆で日本海拡大期に起きた漸新世～中新世火成活動の時間変遷. *日本地質学会第130年学術大会講演要旨*, T15-P9.
- 八木ほか, 2006. K-Ar年代測定のための鉱物分離マニュアル. *地質技術, 創刊準備号(蒜山地質年代学研究所創立10周年記念特集)*, 19–25.
- 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.
- Wiedenbeck et al., 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19, 1–23.

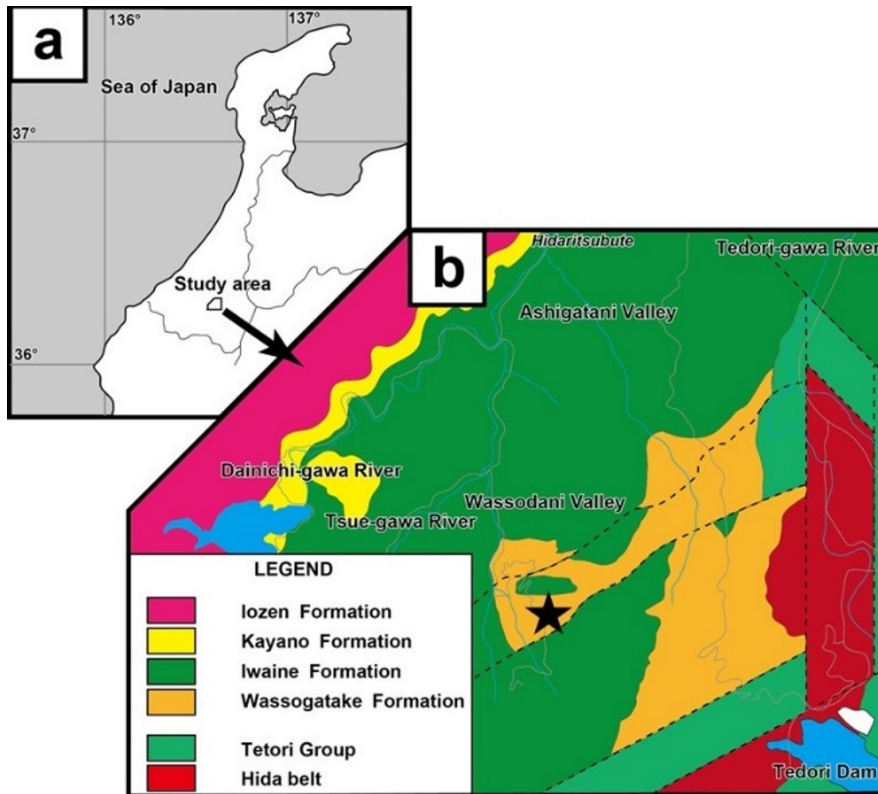


図1 調査地域の地質図。石田ほか（1998）を著者らの調査結果に基づき改変。黒星は試料採取地点。
Fig. 1 Geological Map of study area. Modified from Ishida et al. (1998). Black stars indicate sample locality.

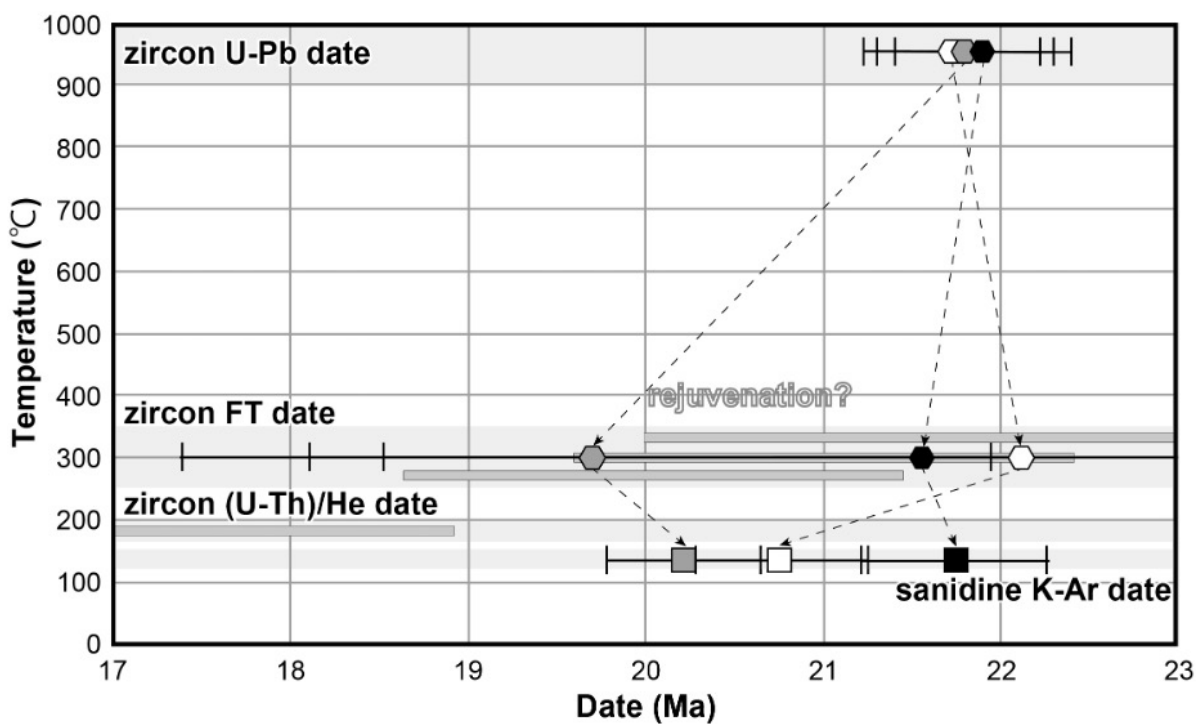


図2 鷲走ヶ岳層から得られた年代値のまとめ。灰色バーは先行研究。
Fig. 2 Summary of dates obtained from the Wassogatake Formation.