青森県南部, 湯ノ沢カルデラ噴出物である尾開山凝灰岩の高精度・高確度噴出年代の決定: 同一ジルコン U–Pb 年代とフィッション・トラック年代のダブル年代測定

Determination of highly precise and accurate eruptive age of Obirakiyama Tuff, ejecta from Yunosawa Caldera, southern Aomori Prefecture: Its zircon U–Pb and fission-track double dating

Abstract

田口春那¹ 折橋裕二¹ 佐々木実¹
宮嶋佑典² 岩野英樹³ 平田岳史⁴

Haruna Taguchi¹, Yuji Orihashi¹,
Minoru Sasaki¹, Yusuke Miyajima²,
Hideki Iwano³ and Takafumi Hirata⁴

2020年9月11日受付.

2021年2月19日受理.

¹ 弘前大学大学院理工学研究科地球環境防災コース
Global Environment and Disaster Prevention,
Graduate School of Science and Engineering,
Hiroshima University, 3 Bunkyo-cho, Hiroshima,
036-8224, Japan

² 産業技術総合研究所地質調査総合センター
Geological Survey of Japan, AIST, Central 7,
1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8567,
Japan

³ (株)京都フィッション・トラック
Kyoto Fission-Track Co., Ltd., Minamita-
jiricho 44-4, Omiya, Kita-ku, Kyoto 603-
8832, Japan

⁴ 東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験
施設
Geochemical Research Center, The Universi-
ty of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-
0033, Japan

* Corresponding author: Y. Orihashi,
oripachi@hiroshima-u.ac.jp

Obirakiyama Tuff (210 km³ DRE), erupted from Yunosawa Caldera in southern part of Hakkoda-Towada caldera cluster, consists of subaerial welded tuff and subaquatic unwelded tuff facies. This study reports zircon U–Pb and fission-track (FT) double dating for five samples collected from the two facies to reconstruct the eruptive ages of each facies. The resulting U–Pb ages for three pumices from the unwelded tuff facies were concentrated at 3.9 Ma, whereas the U–Pb ages of both the welded tuff exposed at the mid-point of Mt. Obiraki and obsidian in Daibutsu Park yielded U–Pb ages of 8.72 ± 0.08 Ma and 5.31 ± 0.05 Ma, respectively. The resultant U–Pb ages corresponded to the double-dated FT ages within the range of the analytical uncertainties, indicating that we succeeded to obtain highly precise and accurate eruptive ages. Thus, this study determined the unwelded tuff facies of the Obirakiyama Tuff were ejected at 3.9 Ma. In strike contrast, remarkably older ages were obtained from two samples of the welded tuff facies. We suggest that 5.3 Ma obtained from the rhyolite (welded tuff facies) may also indicate the eruptive age of the Obirakiyama Tuff but cannot rule out the possibility that there are some welded tuff facies erupted at 3.9 Ma. Moreover, the welded tuff mainly composing Mt. Obiraki (8.7 Ma) can be rather correlated to late Miocene formation. Thus, reexaminations of the eruptive age of the welded tuff facies and their distributions are further required.

Keywords: U–Pb age, fission-track age, zircon, double dating, Obirakiyama Tuff, Yunosawa caldera, Aomori

はじめに

八甲田–十和田カルデラ群の一部を構成する湯ノ沢カルデラは同カルデラ群の中で最も古く、鮮新世(約 3.5 Ma)に形成されたとされている(村岡, 1991). 湯ノ沢カルデラは直径約 15 km のピストンシリンダー型カルデラと推定されており、低重力異常帯や大規模火砕流堆積物の分布によってその存在が明らかにされた(村岡・長谷, 1990; 村岡・高倉, 1988; 村岡ほか, 1991). 湯ノ沢カルデラ主要構成噴出物は尾開山凝灰岩と総称され、陸成の溶結凝灰岩相(黒曜岩を伴う)と海成の非溶結軽石凝灰岩相に区分されている(村岡・長谷, 1990). 尾開山凝灰岩の噴出量はマグマ換算の体積にして 210 km³(村岡, 1991)と見積もられており、これは他の

八甲田–十和田カルデラ群と比べ最大規模の噴出量である。この噴出量から推定される火山爆発指数(VEI)はレベル 7 に相当し、湯ノ沢カルデラは第四紀における国内の巨大カルデラ噴火として知られている阿蘇カルデラ Aso-4 噴火(384 km³) (例えば、山元, 2015)に匹敵する規模の巨大カルデラ噴火を鮮新世に生じたことになる。

尾開山凝灰岩の噴出年代は村岡(1991)により K–Ar 年代法を用いて決定されている。K–Ar 年代法は他の年代法と比べ比較的簡便で高精度の年代値を得られ、噴出年代決定において最も有用な手法の 1 つである。しかし、取り扱う岩石試料の状態によっては、変質によって Ar が溶脱し年代値が見かけ上若くなってしまうことや、溶結凝灰岩のような急冷ガラスを含む場合、過剰 Ar の影響により見かけ上古い年代

値になってしまうなど、得られた年代値の確度において問題を生じることがある(例えば, 兼岡, 1998). 村岡(1991)は尾開山凝灰岩の噴出年代を概ね 3.5 Ma としたが, 報告された年代値は 5.6~2.5 Ma の幅を持っている(Table A1). この年代幅が岩相ごとの噴出年代を示しているのか, あるいは前述した二次的影響による年代値の分散によるものなのかはこれまで十分な検討が行われていなかった. そこで本報では尾開山凝灰岩の溶結凝灰岩相と非溶結凝灰岩相中に含まれるジルコンについて, 同一粒子の U-Pb 年代法とフィッシュン・トラック(以下, FT)年代法によるダブル年代測定(岩野ほか, 2012)を行い, 尾開山凝灰岩の各岩相の噴出年代の再検討を行った.

U-Pb 年代法においてジルコンの閉鎖温度は 900°C (Cherniak and Watson, 2000)であり, ジルコンを晶出したマグマが短期間に噴出すれば精度・確度の高い噴出年代を得ることができる. しかし, 本研究で取り扱うような火砕岩の場合, 希に本源ジルコンは晶出せず外来ジルコンだけからなる火砕岩(火山岩)の報告例もあり(例えば, 檀原ほか, 2005; Orihashi et al., 2013), 必ずしも得られたジルコンの U-Pb 年代値が噴出年代を示すとは言えない場合もある. 一方, FT 年代法においてジルコンの閉鎖温度は約 250°C (Hurlford, 1986; Tagami et al., 1995; Bernet, 2009)であり, 仮に外来ジルコンが混入したとしても FT はリセットされるため噴出年代を得ることができる. しかし, 今回のような噴出年代が比較的若い火砕岩が研究対象の場合, 十分な FT の計数を得ることができず年代値の精度が向上しないという難点がある. したがって, 後期新生代火砕岩の噴出年代を高精度・高確度を得るためには, 本報で行ったような同一ジルコン粒子の U-Pb・FT ダブル年代測定が有効となる.

地 質 概 要

湯ノ沢カルデラは青森県中央南部に位置し, その北半分には碓ヶ関カルデラ(2.5 Ma)が重複して形成されている(Fig. 1). このため北側のカルデラ縁は碓ヶ関カルデラと重複しているか, 碓ヶ関カルデラの形成により失われていると考えられる(村岡・長谷, 1990). このように地形の形態的保存は良好ではないものの, カルデラ周辺の重力急傾斜帯の一部に環状断層の露出が見られることから, 湯ノ沢カルデラはピストン状の陥没構造を特徴とするバイアス型カルデラに属する可能性が高いことが指摘されている(村岡・高倉, 1988; 村岡ほか, 1991).

尾開山凝灰岩は下位の中新統を構造差の大きな不整合で覆い, 上位の三ツ森安山岩や虹貝凝灰岩に不整合で覆われている(村岡・長谷, 1990). 尾開山凝灰岩および近傍地域に分布する湯ノ沢カルデラ形成以降のその他のカルデラ噴出物とは鉱物組合せおよび全岩化学組成の組成範囲によって明瞭に区別される(内山・佐々木, 1999). 陸成の溶結凝灰岩相はカルデラ近傍に分布しており, 明灰色を呈し, 節理の発達する硬く均質な岩相を示す. 一方, 海成の非溶結凝灰岩相である軽石凝灰岩はカルデラ縁以北に広く分布している. カルデラ縁近傍では塊状部が卓越し, その外側では明瞭な葉理を伴う成

Fig. 1. Geological map showing the distribution of welded and non-welded tuff facies of the Obirakiyama Tuff, sampling sites. Inferred Ikarigaseki and Yunosawa Calderas (Muraoka et al., 1991) are demarcated by dashed and bold lines, respectively. This figure is partly modified from Muraoka and Hase (1990) and Kudo et al. (2007).

層部が卓越する. このように海成の非溶結凝灰岩相は湯ノ沢カルデラの内側, そして北方に向かう地域に分布していることから, 尾開山凝灰岩堆積時の湯ノ沢カルデラは, 現在の南九州の始良カルデラに類似した, 海域の湾入部であったと考えられている(村岡・長谷, 1990). 村岡・長谷(1990)は溶結凝灰岩相と非溶結凝灰岩相の産状の違いは堆積環境の違いによるものとしたが, 佐々木(2016)では溶結凝灰岩相と非溶結凝灰岩相とで異なる噴出物起源の可能性が指摘されている.

村岡(1991)は尾開山凝灰岩非溶結凝灰岩相として上北地域の清水目川と湯ノ沢カルデラ近傍である小国北部, 北方に位置する法峠の軽石試料からそれぞれ 3.79 ± 0.16 Ma, 3.0 ± 0.3 Ma, 2.5 ± 0.6 Ma (1 σ) の K-Ar 年代を報告している. また, 同溶結凝灰岩相についてはその分布域である上横前沢の試料を用い, 黒雲母および全岩 K-Ar 年代として, それぞれ 5.45 ± 0.46 Ma (1 σ) と 3.55 ± 0.55 Ma の K-Ar 年代値を報告している(Fig. 1). また, 根本(1998)は浪岡川中流域と六枚橋川上流に分布する軽石凝灰岩中の火山ガラスおよび普通角閃石から, それぞれ 3.75 ± 0.35 Ma (1 σ) と 3.93 ± 0.33 Ma および 4.18 ± 0.31 Ma と 4.36 ± 0.31 Ma の K-Ar 年代値を報告し, これらは尾開山凝灰岩に対比される大落前川層としている(Table A1).

Kudo et al. (2007)は八甲田-十和田カルデラ群から噴出

Table 1. Locations of the Obirakiyama Tuff sampling sites.

sample name	sampling site	east longitude	north latitude	area
YN1	1	40°31' 55. 06"	140°31' 33. 91"	Mt. Obiraki, Owani Town, Minamitsugaru District
YN2	2	40°32' 50. 92"	140°32' 37. 63"	Daibutsu Park, Ishikawa, Hirosaki City
YN3	3	40°34' 32. 85"	140°38' 55. 86"	Shiraiwa Forest Park, Osaki, Hirakawa City
YN4	4	40°34' 12. 99"	140°39' 09. 73"	east of Shiraiwa Forest Park, Osaki, Hirakawa City
YN5	5	40°32' 23. 32"	140°35' 46. 96"	Nagamine, Owani Town, Minamitsugaru District

Fig. 2. Field photographs: (a) rhyolitic welded tuff at sampling site 1 (YN1); (b) rhyolite at sampling site 2 (YN2); (c) biotite pumice tuff at sampling site 3 (YN3); and (d) biotite pumice tuff at sampling site 4 (YN4).

した軽石および溶結凝灰岩の全岩化学組成から珪長質マグマの特徴を明らかにし、同珪長質マグマの分化トレンドはカリウム含有量の高い **high-K type** (以下, **HK 型**) と中程度から低い **middle-to low type** (**MLK 型**) に分類されることを見出した。また、湯ノ沢カルデラからのものは **HK 型** と **MLK 型** の両方の分化トレンドが見られ、**MLK 型** は八甲田―十和田カルデラ群全ての珪長質マグマから見出されるのに対し、**HK 型** は湯ノ沢カルデラのみであることが指摘されている。**HK 型** マグマに由来する軽石は黒雲母に富む **Bt 型**、**MLK 型** マグマに由来する軽石は普通角閃石に富む **Hb 型** に対応し、この 2 種類の軽石は同一のフローユニット中に共存して産する。このことから湯ノ沢カルデラでは 2 種類のマグマが個別のマグマ溜まりを形成し、それらがほぼ同時期に噴出したことが示唆されている。

試 料

本報では、尾開山凝灰岩の溶結凝灰岩相から 2 試料と非溶結凝灰岩相から 3 試料を年代測定に用いた (Table 1)。以下に試料採取地点の産状と岩石学的特徴を示す。

1. 尾開山凝灰岩溶結凝灰岩相

溶結凝灰岩相 2 試料のうち、1 つは尾開山凝灰岩模式地である青森県南津軽郡大鰐町尾開山中腹付近に露出する塊状の流紋岩質溶結凝灰岩 (YN1) から採取した (Fig. 2a)。斑晶は自形～半自形の石英、斜長石、黒雲母、普通角閃石、磁鉄鉱からなり、石基は隠微晶質を呈し、少量の磁鉄鉱とジルコンを含む (Fig. 3a)。もう 1 つは青森県弘前市石川大仏公園付近に露出する流紋岩試料 (YN2) を採取した。流理構造が顕著であり、大部分が黒曜岩化している (Fig. 2b)。斑晶は自形～半自形の斜長石、石英、黒雲母と磁鉄鉱からなり、石

Fig. 3. Photomicrographs of the Obirakiyama Tuff: (a) rhyolitic welded tuff from sampling site 1 (YN1); (b) rhyolite from sampling site 2 (YN2); and (c) biotite pumice in tuff from sampling site 3 (YN3). Abbreviations: PPL (plane-polarized light), XPL (cross-polarized light), Qtz (quartz), Pl (plagioclase), and Bt (biotite). Scale bars are 500 μm .

基は完全ガラス質で真珠岩構造を呈する (Fig. 3b). 村岡・長谷 (1990) は流理構造の特徴から同黒曜岩を溶結凝灰岩の二次流動によるものと解釈した. 一方, 内山・佐々木 (1999) は同黒曜岩を流紋岩質溶岩の一部としている.

2. 尾開山凝灰岩非溶結凝灰岩相

青森県平川市白岩地域には非溶結凝灰岩相が広範囲に露出しており, 特に白岩地域東部, 白岩森林公園から南東約 700 m 付近に位置する道路沿いでは全長約 230 m にわたる連続露頭が観察できる. 試料は白岩森林公園内大規模露頭 (Fig. 2c) と白岩地域東部の連続露頭 (Fig. 2d) の 2 地点から

採取し, 前者の採取地点は後者の採取地点より層準的に上部に当たる. 前者では軽石凝灰岩中に散在する長径 60 cm 大の Bt 型軽石試料 (YN3) を採取し, 後者では軽石凝灰岩層と互層する長径 70 cm 大の軽石濃集層中の Bt 型軽石 (YN4) から採取した. 3 地点目として大鰐町長峰 鯖野沢付近 (採石場) に露出する軽石凝灰岩を対象とし, 同凝灰岩中に含まれる Bt 型と Hb 型の 2 種類の軽石のうち, 本報では Bt 型軽石 (YN5) を採取した. 非溶結凝灰岩相から採取した軽石 3 試料の斑晶は共に自形～半自形の斜長石, 石英, 黒雲母, アルカリ長石と磁鉄鉱からなる (Fig. 3c).

Fig. 4. Photomicrographs of zircons recovered from the Obirakiyama Tuff: (a) before etching, and (b) after etching. Fission-track measurement areas are marked by white rectangles.

3. ジルコン

溶結凝灰岩試料(YN1), 流紋岩試料(YN2)および軽石凝灰岩中の軽石試料(YN3, YN4, YN5)計5試料から抽出したジルコンはすべて自形～半自形であり, YN1とYN2は淡赤～淡褐色, YN3, YN4, YN5は淡赤色を呈する。Fig. A1にジルコンの長径(µm)と頻度の関係図を示す。この図の累積曲線から試料ごとに含まれるジルコン粒子の大きさや淘汰度の特徴を読み取ることができる。軽石試料3試料(YN3, 4, 5)から得られたそれぞれの累積曲線はほぼ一致した特徴を示した。YN1は軽石試料3試料と類似した累積曲線を示すが, やや細粒で淘汰が良い傾向を示した。YN2は長径が100 µm前後と他の4試料に比べ最も細粒であり淘汰も最も良い。5試料中のほとんどのジルコンは結晶内にメルトやアパタイトなどの包有物を含んでいる。

各5試料のジルコンは任意に約70粒を抽出してテフロンシートに埋め込み, その後ダイヤモンドペーストで研磨した。ジルコンの分離および埋め込み・研磨作業は株式会社京都フィッション・トラックにて行った。

分 析 方 法

同一ジルコン粒子におけるU-Pb・FTダブル年代測定法には1)ジルコンをエッチングしFTを計量した後, レーザーアブレーション-ICP質量分析装置(以下, LA-ICP-MS)によりU濃度と $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比およびPb同位体比を測定し,

FT年代とU-Pb年代を測定する方法と2)先にLA-ICP-MSによりU濃度と $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比およびPb同位体比を測定した後, ジルコンをエッチングし, FTを計量する方法の2通りがある。本報では後者を採用した。後者の方法ではレーザー照射時のFTに与える熱的影響がないことがすでに岩野ほか(2012)により検証されている。以下に本報で採用したU-Pb年代とFT年代測定法を示す。

1. U-Pb年代測定法

U-Pb年代測定には東京大学理学系研究科地殻化学実験施設設置のLA-ICP-MSを使用した。同装置のICP-MSはThermo Fisher Scientific社製のiCAP TQであり, LAはSTジャパン社製のフェムト秒レーザーアブレーション装置(Jupiter Solid Nebulizer)を使用した。同レーザービーム径は8 µmで固定されているため, ガルバノ光学系を用いた高速走査により照射時間10秒以内に照射位置を渦巻き状に高速回転させ(Yokoyama et al., 2011; Makino et al., 2019), ジルコン粒径の小さい流紋岩試料(YN2)についてはクレーター径が15 µmに, また十分な大きさのジルコンが得られた4試料(YN1, YN3, YN4, YN5)についてはクレーター径が30 µmになるように調整した。各ジルコン粒子のレーザー照射位置は, 本報の目的が尾開山凝灰岩の噴出年代を得ること, また, U-Pb年代測定後FT年代によるFT計量を行うことから, 主にジルコン粒子のリム部を照射した。比較的大きめの粒子はリムと中心部(コア)の複数点を

Table 2. Zircon U–Pb ages obtained for the Obirakiyama Tuff by LA–ICP–MS.

spot no.	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error 2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error 2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error 2σ	Disc*	$^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error 2σ	$^{235}\text{U}-^{207}\text{Pb}$ age (Ma)	Error 2σ	$f(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})^{**}$ (%)	$^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb}$ age*** (Ma)	Error 2σ
1	0.54	0.395 ± 0.017		0.002099 ± 0.000051		0.1143 ± 0.0056		-671	13.52 ± 0.33		109.9 ± 5.4		42.2	8.20 ± 0.12	
2	0.35	0.080 ± 0.011		0.001393 ± 0.000040		0.0153 ± 0.0022		-44.5	8.98 ± 0.26		15.4 ± 2.2		4.05	8.62 ± 0.24	
3	0.55	0.086 ± 0.011		0.001466 ± 0.000042		0.0175 ± 0.0023		-58.4	9.44 ± 0.27		17.6 ± 2.4		4.86	8.97 ± 0.24	
4	0.45	0.0823 ± 0.0093		0.001400 ± 0.000036		0.0159 ± 0.0018		-54.3	9.02 ± 0.23		16.0 ± 1.9		4.36	8.63 ± 0.22	
5	0.28	0.0794 ± 0.0055		0.001461 ± 0.000029		0.0160 ± 0.0012		-56.9	9.41 ± 0.19		16.1 ± 1.2		4.02	9.02 ± 0.17	
6	0.42	0.107 ± 0.010		0.001537 ± 0.000040		0.0226 ± 0.0022		-104	9.90 ± 0.26		22.7 ± 2.2		7.33	9.15 ± 0.22	
7	0.38	0.0886 ± 0.0074		0.001449 ± 0.000033		0.0177 ± 0.0015		-72.1	9.33 ± 0.21		17.8 ± 1.5		5.14	8.85 ± 0.19	
8	0.32	0.1165 ± 0.0077		0.001508 ± 0.000033		0.0242 ± 0.0017		-130.5	9.72 ± 0.21		24.3 ± 1.7		8.50	8.75 ± 0.18	
9	0.62	0.106 ± 0.012		0.001553 ± 0.000046		0.0226 ± 0.0027		-97.4	10.00 ± 0.29		22.7 ± 2.7		7.19	9.25 ± 0.26	
10	0.52	0.371 ± 0.020		0.002383 ± 0.000067		0.1218 ± 0.0073		-61.2	15.34 ± 0.43		116.7 ± 7.0		39.2	9.11 ± 0.15	
11	0.64	0.1084 ± 0.0081		0.001472 ± 0.000035		0.0220 ± 0.0017		-112	9.48 ± 0.22		22.1 ± 1.7		7.52	8.77 ± 0.19	
12	1.5	0.398 ± 0.016		0.002515 ± 0.000057		0.1379 ± 0.0062		-671	16.19 ± 0.37		131.2 ± 5.9		42.5	9.08 ± 0.12	
13	0.64	0.0788 ± 0.0052		0.001419 ± 0.000029		0.0154 ± 0.0011		-56.1	9.14 ± 0.18		15.5 ± 1.1		3.94	8.78 ± 0.17	
14	1.8	0.0616 ± 0.0023		0.001343 ± 0.000021		0.01140 ± 0.00046		-26.1	8.65 ± 0.13		11.51 ± 0.46		1.86	8.50 ± 0.13	
15	2.4	0.0675 ± 0.0052		0.001486 ± 0.000031		0.0138 ± 0.0011		-32.0	9.57 ± 0.20		13.9 ± 1.1		2.57	9.31 ± 0.19	
16	0.33	0.0655 ± 0.0042		0.001450 ± 0.000028		0.01310 ± 0.00088		-30.0	9.34 ± 0.18		13.21 ± 0.89		2.33	9.12 ± 0.17	
17	0.58	0.367 ± 0.019		0.00217 ± 0.00010		0.1098 ± 0.0078		-59.8	13.98 ± 0.67		105.8 ± 7.5		38.8	8.65 ± 0.26	
18	0.51	0.157 ± 0.014		0.001576 ± 0.000078		0.0341 ± 0.0034		-197	10.15 ± 0.50		34.0 ± 3.4		13.4	8.79 ± 0.38	
19	0.44	0.192 ± 0.013		0.001695 ± 0.000082		0.0448 ± 0.0038		-26.8	10.92 ± 0.53		44.5 ± 3.7		17.6	8.96 ± 0.36	
20	0.26	0.347 ± 0.021		0.00269 ± 0.00013		0.129 ± 0.010		-54.9	17.35 ± 0.87		123.0 ± 9.6		36.3	10.10 ± 0.30	
21	0.47	0.115 ± 0.012		0.001430 ± 0.000071		0.0227 ± 0.0026		-115	9.21 ± 0.46		22.8 ± 2.6		8.36	8.47 ± 0.38	
22	0.44	0.0855 ± 0.0081		0.001570 ± 0.000073		0.0185 ± 0.0020		-60.0	10.11 ± 0.47		18.6 ± 2.0		4.75	9.59 ± 0.42	
23	0.39	0.0680 ± 0.0056		0.001376 ± 0.000061		0.0129 ± 0.0012		-28.6	8.87 ± 0.40		13.0 ± 1.2		2.64	8.64 ± 0.38	
24	0.30	0.3380 ± 0.0091		0.001860 ± 0.000079		0.0867 ± 0.0043		-56.5	11.98 ± 0.51		84.4 ± 4.2		35.3	8.09 ± 0.24	
25	0.22	0.2072 ± 0.0075		0.001772 ± 0.000076		0.0506 ± 0.0028		-31.0	11.41 ± 0.49		50.1 ± 2.8		19.5	8.51 ± 0.30	
26	0.54	0.0803 ± 0.0043		0.001482 ± 0.000037		0.01641 ± 0.00097		-60.4	9.54 ± 0.24		16.5 ± 1.0		4.12	9.09 ± 0.22	
27	0.57	0.0758 ± 0.0054		0.001467 ± 0.000039		0.0153 ± 0.0012		-48.3	9.45 ± 0.25		15.5 ± 1.2		3.58	8.54 ± 0.22	
28	0.36	0.0735 ± 0.0039		0.001443 ± 0.000035		0.01461 ± 0.00084		-46.9	9.29 ± 0.23		14.73 ± 0.85		3.30	8.98 ± 0.22	
29	0.57	0.0741 ± 0.0057		0.001471 ± 0.000040		0.0150 ± 0.0012		-44.2	9.48 ± 0.26		15.2 ± 1.2		3.37	9.14 ± 0.24	
30	0.82	0.0681 ± 0.0037		0.001450 ± 0.000035		0.01362 ± 0.00082		-35.8	9.34 ± 0.23		13.74 ± 0.82		2.65	9.06 ± 0.22	
31	0.68	0.0791 ± 0.0038		0.001375 ± 0.000033		0.01499 ± 0.00080		-59.0	8.86 ± 0.21		15.11 ± 0.81		3.98	8.52 ± 0.20	
32	0.52	0.0859 ± 0.0056		0.001433 ± 0.000038		0.0170 ± 0.0012		-69.4	9.23 ± 0.24		17.1 ± 1.2		4.80	8.79 ± 0.22	
33	0.60	0.0768 ± 0.0034		0.001388 ± 0.000033		0.01469 ± 0.00074		-55.0	8.94 ± 0.21		14.81 ± 0.75		3.70	8.54 ± 0.19	
34	0.88	0.1173 ± 0.0052		0.001470 ± 0.000036		0.0238 ± 0.0012		-137	9.47 ± 0.23		23.9 ± 1.2		8.60	8.67 ± 0.19	
35	0.64	0.465 ± 0.027		0.00335 ± 0.00012		0.215 ± 0.014		-752	21.53 ± 0.75		197.3 ± 13		50.7	9.61 ± 0.15	
36	0.64	0.315 ± 0.020		0.002012 ± 0.000070		0.0873 ± 0.0062		-505	12.96 ± 0.45		85.0 ± 6.1		32.5	8.67 ± 0.20	
37	0.44	0.0655 ± 0.0090		0.001476 ± 0.000052		0.0133 ± 0.0019		-17.7	9.51 ± 0.33		13.4 ± 1.9		2.33	8.79 ± 0.30	
38	0.30	0.0778 ± 0.0078		0.001513 ± 0.000051		0.0162 ± 0.0017		-46.7	9.75 ± 0.33		16.4 ± 1.7		3.82	8.79 ± 0.28	
39	0.82	0.546 ± 0.032		0.00327 ± 0.00012		0.246 ± 0.017		-886	21.05 ± 0.75		223 ± 15		60.4	8.60 ± 0.13	
40	0.78	0.436 ± 0.027		0.00309 ± 0.00011		0.186 ± 0.013		-704	19.89 ± 0.73		173 ± 12		47.2	9.62 ± 0.17	
41	0.40	0.317 ± 0.048		0.00178 ± 0.00010		0.078 ± 0.013		-450	11.46 ± 0.67		76 ± 12		32.7	8.04 ± 0.32	
42	0.48	0.382 ± 0.024		0.001993 ± 0.000082		0.1049 ± 0.0079		-625	12.83 ± 0.53		101.2 ± 7.6		40.6	8.06 ± 0.20	
43	0.36	0.0638 ± 0.0070		0.001424 ± 0.000049		0.0125 ± 0.0014		-18.6	9.17 ± 0.31		12.6 ± 1.4		2.13	8.42 ± 0.28	
44	0.38	0.0749 ± 0.0045		0.001514 ± 0.000032		0.0156 ± 0.0010		-49.0	9.75 ± 0.20		15.7 ± 1.0		3.46	8.82 ± 0.18	
45	0.33	0.0600 ± 0.0043		0.001414 ± 0.000031		0.01170 ± 0.00088		-17.7	9.11 ± 0.20		11.81 ± 0.89		1.67	8.62 ± 0.18	
46	0.42	0.122 ± 0.014		0.001579 ± 0.000060		0.0266 ± 0.0031		-128	10.17 ± 0.39		26.7 ± 3.1		9.22	9.19 ± 0.32	
47	0.43	0.156 ± 0.015		0.001582 ± 0.000059		0.0341 ± 0.0035		-196	10.19 ± 0.38		34.0 ± 3.5		13.3	8.83 ± 0.28	
48	0.47	0.0896 ± 0.0068		0.001427 ± 0.000036		0.0176 ± 0.0014		-75.0	9.19 ± 0.23		17.7 ± 1.4		5.24	8.61 ± 0.20	
49	0.74	0.113 ± 0.011		0.001626 ± 0.000054		0.0253 ± 0.0026		-114	10.47 ± 0.35		25.4 ± 2.7		8.08	9.55 ± 0.30	

*Degree of discordance, where negative numbers and blank cells show normal discordance and concordance within 2σ of the analytical error, respectively. **Percentage of degree of common Pb contamination. ***Correction of common Pb was calculated using IsoplotR (Vermeesch, 2018).

Table 2. Continued.

spot no.	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error	Disc*	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error	$^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ age (Ma)	Error	$f(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})^{**}$ (%)	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ age*** (Ma)	Error	
			2 σ		2 σ		2 σ	(%)		2 σ		2 σ			2 σ	
50	0.83	0.0676	± 0.0087	0.001505	± 0.000049	0.0140	± 0.0019	-23.3	9.69	± 0.32	14.1	± 1.9	2.58	9.43	± 0.30	
51	0.57	0.0643	± 0.0021	0.001457	± 0.000023	0.01293	± 0.00046	-32.4	9.39	± 0.15	13.04	± 0.47	2.19	8.67	± 0.13	
52	0.59	0.0739	± 0.0020	0.001449	± 0.000023	0.01477	± 0.00047	-52.9	9.33	± 0.14	14.88	± 0.47	3.36	8.50	± 0.13	
53	0.50	0.0937	± 0.0051	0.001496	± 0.000037	0.0193	± 0.0012	-87.2	9.64	± 0.24	19.4	± 1.2	5.75	8.61	± 0.20	
54	0.49	0.0854	± 0.0055	0.001465	± 0.000037	0.0173	± 0.0012	-68.8	9.44	± 0.24	17.4	± 1.2	4.74	8.52	± 0.20	
55	0.24	0.0968	± 0.0084	0.001506	± 0.000044	0.0201	± 0.0018	-86.1	9.70	± 0.29	20.2	± 1.9	6.11	8.90	± 0.24	
56	0.29	0.0809	± 0.0074	0.001508	± 0.000043	0.0168	± 0.0016	-54.6	9.71	± 0.28	16.9	± 1.6	4.19	9.02	± 0.24	
57	0.46	0.312	± 0.016	0.002123	± 0.000065	0.0914	± 0.0054	-508	13.67	± 0.42	88.8	± 5.3	32.2	9.11	± 0.19	
58	0.40	0.0827	± 0.0059	0.001491	± 0.000039	0.0170	± 0.0013	-62.1	9.60	± 0.25	17.1	± 1.3	4.42	8.80	± 0.22	
59	0.89	0.151	± 0.012	0.001557	± 0.000050	0.0324	± 0.0028	-192	10.03	± 0.32	32.4	± 2.8	12.7	8.53	± 0.24	
60	0.43	0.0902	± 0.0067	0.001541	± 0.000042	0.0192	± 0.0015	-76.0	9.93	± 0.27	19.3	± 1.5	5.32	9.11	± 0.24	
61	0.44	0.213	± 0.018	0.001753	± 0.000048	0.0514	± 0.0046	-309	11.29	± 0.31	50.9	± 4.5	20.2	8.97	± 0.20	
62	0.46	0.520	± 0.016	0.002987	± 0.000057	0.2143	± 0.0077	-887	19.23	± 0.37	197.2	± 7.1	57.4	8.453	± 0.074	
63	0.82	0.549	± 0.014	0.003580	± 0.000061	0.2711	± 0.0082	-923	23.03	± 0.39	243.5	± 7.4	60.9	8.673	± 0.060	
64	0.33	0.1004	± 0.0056	0.001485	± 0.000026	0.0206	± 0.0012	-102	9.57	± 0.17	20.7	± 1.2	6.56	8.43	± 0.14	
65	0.42	0.182	± 0.011	0.001546	± 0.000033	0.0387	± 0.0024	-261	9.96	± 0.21	38.6	± 2.4	16.4	8.13	± 0.15	
66	0.46	0.347	± 0.027	0.002071	± 0.000066	0.0991	± 0.0083	-556	13.33	± 0.42	95.9	± 8.1	36.4	8.59	± 0.18	
67	0.54	0.146	± 0.010	0.001606	± 0.000035	0.0323	± 0.0024	-187	10.34	± 0.22	32.3	± 2.4	12.1	8.81	± 0.17	
68	0.51	0.133	± 0.010	0.001692	± 0.000038	0.0310	± 0.0025	-159	10.90	± 0.24	31.0	± 2.5	10.5	9.29	± 0.18	
average															8.82 ± 0.22	
weighted mean															8.730 ± 0.077	
MSWD															12.60	
XN2	1	0.46	0.074	± 0.011	0.000863	± 0.000030	0.0088	± 0.0013	5.56	± 0.19	8.9	± 1.3	3.72	5.35	± 0.18	
	2	0.50	0.084	± 0.012	0.000849	± 0.000031	0.0100	± 0.0015	5.60	± 0.20	10.1	± 1.5	4.93	5.32	± 0.18	
	3	0.34	0.239	± 0.025	0.001042	± 0.000045	0.0343	± 0.0039	6.72	± 0.29	34.2	± 3.9	25.4	5.09	± 0.17	
	4	0.42	0.076	± 0.019	0.000861	± 0.000038	0.0090	± 0.0023	5.55	± 0.24	9.1	± 2.3	3.94	5.33	± 0.22	
	5	0.44	0.0618	± 0.0081	0.000865	± 0.000028	0.00737	± 0.00099	5.58	± 0.18	7.5	± 1.0	2.06	5.46	± 0.17	
	6	0.43	0.118	± 0.017	0.000991	± 0.000039	0.0162	± 0.0024	6.39	± 0.25	16.3	± 2.4	9.54	5.73	± 0.20	
	7	0.40	0.085	± 0.016	0.000829	± 0.000033	0.0097	± 0.0019	5.34	± 0.21	9.9	± 1.9	5.17	5.07	± 0.19	
	8	1.56	0.063	± 0.012	0.000852	± 0.000031	0.0075	± 0.0014	7.12	± 0.20	7.5	± 1.5	2.29	5.37	± 0.19	
	9	0.37	0.107	± 0.018	0.000907	± 0.000049	0.0134	± 0.0024	8.53	± 0.31	13.5	± 2.4	8.06	5.37	± 0.26	
	10	0.55	0.0722	± 0.0072	0.000889	± 0.000039	0.00885	± 0.00096	34.9	5.73	± 0.25	8.95	± 0.97	3.44	5.52	± 0.24
	11	0.44	0.071	± 0.011	0.000880	± 0.000042	0.0087	± 0.0014	-24.5	5.67	± 0.27	8.8	± 1.4	3.34	5.47	± 0.26
	12	0.33	0.0633	± 0.0085	0.000851	± 0.000039	0.0074	± 0.0011	-13.0	5.48	± 0.25	7.5	± 1.1	2.26	5.36	± 0.24
	13	7.37	0.424	± 0.022	0.001759	± 0.000077	0.1028	± 0.0071	-712	11.33	± 0.49	99.4	± 6.8	49.8	5.50	± 0.12
	14	0.49	0.0716	± 0.0073	0.000864	± 0.000038	0.00852	± 0.00094	-33.3	5.57	± 0.24	8.62	± 0.95	3.35	5.38	± 0.22
	15	0.39	0.0625	± 0.0069	0.000874	± 0.000038	0.00752	± 0.00090	-14.7	5.63	± 0.25	7.61	± 0.91	2.15	5.50	± 0.24
	16	0.47	0.0723	± 0.0076	0.000890	± 0.000039	0.0089	± 0.0010	-34.3	5.74	± 0.25	9.0	± 1.0	3.46	5.53	± 0.24
	17	0.37	0.130	± 0.022	0.000902	± 0.000051	0.0161	± 0.0029	-124	5.81	± 0.33	16.3	± 2.9	11.0	5.19	± 0.26
	18	0.40	0.0902	± 0.0075	0.000915	± 0.000030	0.0114	± 0.0010	-74.2	5.90	± 0.19	11.5	± 1.0	5.81	5.54	± 0.17
	19	0.45	0.099	± 0.017	0.000908	± 0.000042	0.0124	± 0.0021	-72.1	5.85	± 0.27	12.5	± 2.2	6.97	5.44	± 0.24
	20	0.51	0.071	± 0.016	0.000881	± 0.000042	0.0086	± 0.0020	-12.6	5.68	± 0.27	8.7	± 2.0	3.27	5.49	± 0.26
	21	0.81	0.073	± 0.016	0.000818	± 0.000039	0.0080	± 0.0019	-12.9	5.27	± 0.25	8.1	± 1.9	3.29	5.11	± 0.24
	22	0.33	0.0533	± 0.0071	0.000868	± 0.000030	0.00637	± 0.00088	-45.5	5.59	± 0.22	6.45	± 0.89	0.93	5.49	± 0.19
	23	0.40	0.081	± 0.011	0.000868	± 0.000034	0.0096	± 0.0014	-45.5	5.59	± 0.22	9.7	± 1.4	4.53	5.34	± 0.20
	24	0.41	0.045	± 0.012	0.000870	± 0.000037	0.0054	± 0.0014	-52.5	5.61	± 0.24	5.5	± 1.4	-0.100	5.61	± 0.24
	25	0.46	0.085	± 0.012	0.000847	± 0.000034	0.0099	± 0.0014	-52.5	5.46	± 0.22	10.0	± 1.4	5.06	5.19	± 0.20
	26	0.44	0.343	± 0.030	0.001312	± 0.000061	0.0620	± 0.0062	-545	8.45	± 0.39	61.0	± 6.1	39.1	5.22	± 0.15
	27	0.34	0.108	± 0.011	0.000874	± 0.000038	0.0130	± 0.0015	-103	5.63	± 0.25	13.1	± 1.5	8.15	5.18	± 0.20

Table 2. Continued.

spot no.	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error 2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error 2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error 2σ	Disc* (%)	$^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error 2σ	$^{235}\text{U}-^{207}\text{Pb}$ age (Ma)	Error 2σ	$f(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})^{**}$ (%)	$^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb}$ age*** (Ma)	Error 2σ
28	0.41	0.0734	± 0.0090	0.000778	± 0.000033	0.00079	± 0.0010	-34.1	5.02	± 0.22	8.0	± 1.0	3.60	4.85	± 0.20
29	0.52	0.058	± 0.012	0.000849	± 0.000041	0.0068	± 0.0015		5.47	± 0.27	6.9	± 1.5	1.56	5.39	± 0.26
30	1.49	0.074	± 0.013	0.000848	± 0.000041	0.0087	± 0.0015	-27.8	5.47	± 0.26	8.8	± 1.6	3.74	5.18	± 0.24
31	0.37	0.154	± 0.014	0.000923	± 0.000041	0.0196	± 0.0020	-194	5.95	± 0.27	19.8	± 2.0	14.3	5.13	± 0.20
32	0.68	0.098	± 0.014	0.000894	± 0.000043	0.0121	± 0.0018	-75.4	5.76	± 0.28	12.3	± 1.9	6.90	5.36	± 0.24
33	0.50	0.116	± 0.020	0.000925	± 0.000051	0.0148	± 0.0027	-99.1	5.96	± 0.33	14.9	± 2.7	9.19	5.41	± 0.26
34	0.45	0.0412	± 0.0075	0.000867	± 0.000037	0.00493	± 0.00092		5.59	± 0.24	4.99	± 0.93	0.00	5.62	± 0.24
35	0.52	0.0560	± 0.0057	0.000878	± 0.000025	0.00678	± 0.00072	-5.39	5.66	± 0.16	6.86	± 0.73	1.30	5.35	± 0.15
36	0.61	0.136	± 0.026	0.000929	± 0.000046	0.0175	± 0.0035	-131	5.99	± 0.30	17.6	± 3.5	11.9	5.28	± 0.24
37	0.40	0.072	± 0.030	0.000858	± 0.000049	0.0085	± 0.0036		5.53	± 0.31	8.6	± 3.6	3.36	5.34	± 0.30
38	0.44	0.069	± 0.031	0.000894	± 0.000052	0.0085	± 0.0038		5.76	± 0.33	8.6	± 3.9	2.97	5.58	± 0.32
39	0.40	0.085	± 0.018	0.000846	± 0.000036	0.0099	± 0.0022	-39.5	5.45	± 0.23	10.1	± 2.2	5.17	5.01	± 0.20
40	0.39	0.079	± 0.015	0.000894	± 0.000035	0.0098	± 0.0019	-33.9	5.76	± 0.23	9.9	± 1.9	4.37	5.42	± 0.20
41	0.40	0.083	± 0.014	0.000884	± 0.000034	0.0102	± 0.0018	-44.8	5.69	± 0.22	10.3	± 1.8	4.91	5.25	± 0.19
42	0.41	0.110	± 0.012	0.000945	± 0.000033	0.0144	± 0.0017	-106	6.09	± 0.21	14.5	± 1.7	8.46	5.38	± 0.17
43	0.41	0.095	± 0.011	0.000901	± 0.000030	0.0117	± 0.0014	-76.7	5.80	± 0.20	11.9	± 1.4	6.39	5.24	± 0.17
44	0.44	0.0687	± 0.0084	0.000838	± 0.000022	0.00794	± 0.00099	-27.5	5.40	± 0.14	8.0	± 1.0	2.99	5.04	± 0.13
45	0.47	0.0648	± 0.0099	0.000976	± 0.000028	0.0087	± 0.0014	-15.5	6.29	± 0.18	8.8	± 1.4	2.46	5.82	± 0.16
46	0.44	0.095	± 0.016	0.000904	± 0.000032	0.0119	± 0.0020	-67.2	5.83	± 0.21	12.0	± 2.0	6.46	5.28	± 0.17
47	0.54	0.226	± 0.018	0.001067	± 0.000035	0.0332	± 0.0028	-339	6.87	± 0.23	33.2	± 2.8	23.7	5.18	± 0.13
48	0.45	0.1093	± 0.0094	0.000896	± 0.000023	0.0135	± 0.0012	-112	5.77	± 0.15	13.6	± 1.2	8.33	5.13	± 0.12
49	0.36	0.060	± 0.011	0.000944	± 0.000028	0.0079	± 0.0014	-4.43	6.08	± 0.18	8.0	± 1.4	1.89	5.70	± 0.17
50	0.40	0.061	± 0.011	0.000916	± 0.000027	0.0078	± 0.0013	-6.36	5.90	± 0.18	7.8	± 1.4	1.98	5.55	± 0.16
51	0.38	0.113	± 0.020	0.000903	± 0.000036	0.0140	± 0.0025	-95.0	5.82	± 0.23	14.1	± 2.6	8.77	5.31	± 0.19
52	0.46	0.066	± 0.015	0.000857	± 0.000031	0.0078	± 0.0018	-5.23	5.52	± 0.20	7.9	± 1.8	2.58	5.28	± 0.19
53	0.44	0.067	± 0.012	0.000877	± 0.000041	0.0081	± 0.0015	-11.7	5.65	± 0.27	8.1	± 1.6	2.70	5.50	± 0.26
54	0.39	0.0548	± 0.0095	0.000866	± 0.000039	0.0065	± 0.0012		5.58	± 0.25	6.6	± 1.2	1.14	5.36	± 0.24
55	0.39	0.071	± 0.010	0.000872	± 0.000040	0.0086	± 0.0013	-25.7	5.62	± 0.26	8.6	± 1.3	3.30	5.28	± 0.24
56	0.43	0.108	± 0.030	0.000896	± 0.000055	0.0133	± 0.0038	-59.7	5.78	± 0.35	13.4	± 3.9	8.15	5.31	± 0.30
57	0.38	0.250	± 0.027	0.001251	± 0.000067	0.0431	± 0.0051	-363	8.06	± 0.43	42.8	± 5.1	26.9	5.73	± 0.22
58	0.45	0.107	± 0.013	0.000888	± 0.000041	0.0131	± 0.0017	-96.6	5.72	± 0.27	13.2	± 1.7	8.00	5.24	± 0.22
59	0.41	0.148	± 0.016	0.000891	± 0.000043	0.0182	± 0.0021	-177	5.74	± 0.27	18.3	± 2.1	13.5	4.93	± 0.20
60	0.58	0.327	± 0.016	0.001296	± 0.000057	0.0585	± 0.0038	-542	8.35	± 0.36	57.7	± 3.7	37.1	5.22	± 0.14
61	0.47	0.164	± 0.010	0.000922	± 0.000040	0.0209	± 0.0016	-222	5.94	± 0.26	21.0	± 1.6	15.6	4.96	± 0.18
62	0.41	0.061	± 0.016	0.000872	± 0.000030	0.0073	± 0.0019		5.62	± 0.19	7.4	± 1.9	1.91	5.34	± 0.18
63	0.36	0.079	± 0.019	0.000793	± 0.000029	0.0087	± 0.0021	-26.2	5.11	± 0.19	8.8	± 2.2	4.40	4.73	± 0.17
64	0.46	0.129	± 0.022	0.000965	± 0.000037	0.0171	± 0.0030	-124	6.22	± 0.24	17.2	± 3.0	10.9	5.52	± 0.19
65	0.52	0.087	± 0.024	0.000817	± 0.000033	0.0098	± 0.0027	-31.0	5.26	± 0.22	9.9	± 2.8	5.38	4.89	± 0.19
66	0.39	0.074	± 0.014	0.000858	± 0.000027	0.0088	± 0.0017	-25.7	5.53	± 0.18	8.9	± 1.7	3.67	5.11	± 0.16
67	0.47	0.053	± 0.013	0.000875	± 0.000027	0.0064	± 0.0016		5.64	± 0.18	6.5	± 1.6	0.928	5.38	± 0.17
68	0.67	0.073	± 0.025	0.000814	± 0.000034	0.0081	± 0.0028		5.24	± 0.22	8.2	± 2.8	3.49	5.07	± 0.20
69	0.39	0.082	± 0.011	0.000822	± 0.000024	0.0093	± 0.0013	-49.5	5.30	± 0.15	9.4	± 1.3	4.72	4.90	± 0.13
70	0.79	0.132	± 0.015	0.000986	± 0.000031	0.0179	± 0.0022	-146	6.35	± 0.20	18.0	± 2.2	11.3	5.44	± 0.15
average															5.32 $\pm$ 0.20
weighted mean															5.303 $\pm$ 0.048
MSWD															4.30
YN3															
1	0.49	0.290	± 0.047	0.00105	± 0.00010	0.0418	± 0.0079	-391	6.74	± 0.65	41.6	± 7.8	31.5	4.39	± 0.28
2	0.68	0.326	± 0.070	0.00101	± 0.00011	0.045	± 0.011	-417	6.52	± 0.68	45	± 11	36.3	4.09	± 0.26
3	0.28	0.114	± 0.020	0.000657	± 0.000058	0.0103	± 0.0020	-89.4	4.23	± 0.37	10.4	± 2.0	8.76	3.87	± 0.32

Table 2. Continued.

spot no.	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error 2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error 2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error 2σ	Disc* (%)	$^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb}$ age (Ma)	Error 2σ	$^{235}\text{U}-^{207}\text{Pb}$ age (Ma)	Error 2σ	$f(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})^{**}$ (%)	$^{238}\text{U}-^{206}\text{Pb}$ age*** (Ma)	Error 2σ
4	0.76	0.151 $\pm$ 0.047	0.000734 $\pm$ 0.000072	0.0153 $\pm$ 0.0050	-109	4.73 $\pm$ 0.46	15.4 $\pm$ 5.1	13.6	4.07 $\pm$ 0.34					4.07 $\pm$ 0.34	
5	0.81	0.446 $\pm$ 0.034	0.00148 $\pm$ 0.00013	0.091 $\pm$ 0.011	-711	9.54 $\pm$ 0.85	88 $\pm$ 10	51.8	4.25 $\pm$ 0.17					4.25 $\pm$ 0.17	
6	0.55	0.297 $\pm$ 0.043	0.001016 $\pm$ 0.000096	0.0416 $\pm$ 0.0072	-414	6.55 $\pm$ 0.62	41.4 $\pm$ 7.1	32.5	4.26 $\pm$ 0.26					4.26 $\pm$ 0.26	
7	0.42	0.278 $\pm$ 0.040	0.000751 $\pm$ 0.000070	0.0288 $\pm$ 0.0049	-384	4.84 $\pm$ 0.45	28.8 $\pm$ 4.9	30.1	3.54 $\pm$ 0.24					3.54 $\pm$ 0.24	
8	0.40	0.251 $\pm$ 0.037	0.000813 $\pm$ 0.000076	0.0282 $\pm$ 0.0049	-335	5.24 $\pm$ 0.49	28.2 $\pm$ 4.9	26.6	3.88 $\pm$ 0.26					3.88 $\pm$ 0.26	
9	0.78	0.618 $\pm$ 0.037	0.00195 $\pm$ 0.00018	0.166 $\pm$ 0.018	-999	12.57 $\pm$ 1.14	156 $\pm$ 17	74.1	3.76 $\pm$ 0.10					3.76 $\pm$ 0.10	
10	0.69	0.190 $\pm$ 0.024	0.000728 $\pm$ 0.000047	0.0191 $\pm$ 0.0027	-244	4.69 $\pm$ 0.31	19.2 $\pm$ 2.7	18.6	3.85 $\pm$ 0.20					3.85 $\pm$ 0.20	
11	0.51	0.338 $\pm$ 0.025	0.001070 $\pm$ 0.000066	0.0498 $\pm$ 0.0048	-541	6.89 $\pm$ 0.43	49.3 $\pm$ 4.7	37.8	4.17 $\pm$ 0.15					4.17 $\pm$ 0.15	
12	0.54	0.385 $\pm$ 0.053	0.001029 $\pm$ 0.000086	0.0546 $\pm$ 0.0088	-575	6.63 $\pm$ 0.55	54.0 $\pm$ 8.7	43.9	3.83 $\pm$ 0.18					3.83 $\pm$ 0.18	
13	0.55	0.307 $\pm$ 0.044	0.000936 $\pm$ 0.000074	0.0395 $\pm$ 0.0065	-438	6.03 $\pm$ 0.48	39.4 $\pm$ 6.5	33.7	3.99 $\pm$ 0.20					3.99 $\pm$ 0.20	
14	0.50	0.564 $\pm$ 0.020	0.00200 $\pm$ 0.00011	0.155 $\pm$ 0.010	-960	12.85 $\pm$ 0.71	146.6 $\pm$ 9.6	67.1	4.056 $\pm$ 0.070					4.056 $\pm$ 0.070	
15	0.96	0.154 $\pm$ 0.037	0.000763 $\pm$ 0.000060	0.0162 $\pm$ 0.0041	-140	4.92 $\pm$ 0.39	16.3 $\pm$ 4.1	13.9	4.20 $\pm$ 0.28					4.20 $\pm$ 0.28	
16	0.27	0.315 $\pm$ 0.022	0.000916 $\pm$ 0.000055	0.0398 $\pm$ 0.0037	-502	5.90 $\pm$ 0.36	39.6 $\pm$ 3.7	34.8	3.89 $\pm$ 0.15					3.89 $\pm$ 0.15	
17	0.73	0.168 $\pm$ 0.033	0.000872 $\pm$ 0.000065	0.0203 $\pm$ 0.0043	-179	5.62 $\pm$ 0.42	20.4 $\pm$ 4.3	15.9	4.59 $\pm$ 0.28					4.59 $\pm$ 0.28	
18	1.22	0.151 $\pm$ 0.018	0.000814 $\pm$ 0.000050	0.0169 $\pm$ 0.0022	-176	5.24 $\pm$ 0.32	17.0 $\pm$ 2.2	13.5	4.45 $\pm$ 0.24					4.45 $\pm$ 0.24	
19	0.41	0.383 $\pm$ 0.035	0.001124 $\pm$ 0.000085	0.0593 $\pm$ 0.0070	-605	7.24 $\pm$ 0.55	58.5 $\pm$ 6.9	43.6	4.04 $\pm$ 0.17					4.04 $\pm$ 0.17	
20	0.39	0.443 $\pm$ 0.038	0.001166 $\pm$ 0.000088	0.0713 $\pm$ 0.0081	-717	7.51 $\pm$ 0.56	69.9 $\pm$ 7.9	51.4	3.81 $\pm$ 0.14					3.81 $\pm$ 0.14	
21	0.28	0.170 $\pm$ 0.021	0.000724 $\pm$ 0.000054	0.0170 $\pm$ 0.0025	-206	4.67 $\pm$ 0.35	17.1 $\pm$ 2.5	16.1	3.93 $\pm$ 0.24					3.93 $\pm$ 0.24	
22	3.64	0.414 $\pm$ 0.029	0.001186 $\pm$ 0.000084	0.0677 $\pm$ 0.0067	-677	7.64 $\pm$ 0.54	66.5 $\pm$ 6.6	47.7	3.99 $\pm$ 0.15					3.99 $\pm$ 0.15	
23	1.89	0.122 $\pm$ 0.015	0.000721 $\pm$ 0.000052	0.0121 $\pm$ 0.0018	-118	4.65 $\pm$ 0.33	12.2 $\pm$ 1.8	9.79	4.17 $\pm$ 0.26					4.17 $\pm$ 0.26	
24	0.81	0.489 $\pm$ 0.036	0.001225 $\pm$ 0.000089	0.0826 $\pm$ 0.0086	-808	7.89 $\pm$ 0.57	80.6 $\pm$ 8.3	57.4	3.69 $\pm$ 0.12					3.69 $\pm$ 0.12	
25	0.27	0.062 $\pm$ 0.011	0.000620 $\pm$ 0.000044	0.0053 $\pm$ 0.0010	-2.16	3.99 $\pm$ 0.28	5.4 $\pm$ 1.0	2.11	3.91 $\pm$ 0.28					3.91 $\pm$ 0.28	
26	0.52	0.305 $\pm$ 0.033	0.000874 $\pm$ 0.000067	0.0368 $\pm$ 0.0049	-457	5.63 $\pm$ 0.43	36.7 $\pm$ 4.9	33.6	3.82 $\pm$ 0.20					3.82 $\pm$ 0.20	
27	0.55	0.295 $\pm$ 0.040	0.000868 $\pm$ 0.000071	0.0353 $\pm$ 0.0056	-421	5.59 $\pm$ 0.46	35.2 $\pm$ 5.6	32.2	3.85 $\pm$ 0.22					3.85 $\pm$ 0.22	
28	0.78	0.413 $\pm$ 0.044	0.001368 $\pm$ 0.000089	0.0779 $\pm$ 0.0097	-651	8.81 $\pm$ 0.57	76.2 $\pm$ 9.4	47.6	4.29 $\pm$ 0.13					4.29 $\pm$ 0.13	
29	1.00	0.332 $\pm$ 0.046	0.000802 $\pm$ 0.000057	0.0368 $\pm$ 0.0057	-492	5.17 $\pm$ 0.37	36.6 $\pm$ 5.7	37.1	3.49 $\pm$ 0.17					3.49 $\pm$ 0.17	
30	0.37	0.380 $\pm$ 0.031	0.001041 $\pm$ 0.000057	0.0545 $\pm$ 0.0054	-618	6.71 $\pm$ 0.37	53.9 $\pm$ 5.3	43.2	3.88 $\pm$ 0.12					3.88 $\pm$ 0.12	
31	0.40	0.268 $\pm$ 0.024	0.000806 $\pm$ 0.000044	0.0298 $\pm$ 0.0032	-409	5.19 $\pm$ 0.28	29.9 $\pm$ 3.2	28.8	3.78 $\pm$ 0.15					3.78 $\pm$ 0.15	
32	0.46	0.160 $\pm$ 0.022	0.000710 $\pm$ 0.000040	0.0157 $\pm$ 0.0023	-189	4.58 $\pm$ 0.26	15.8 $\pm$ 2.3	14.8	3.91 $\pm$ 0.19					3.91 $\pm$ 0.19	
33	0.31	0.205 $\pm$ 0.034	0.000730 $\pm$ 0.000048	0.0206 $\pm$ 0.0037	-256	4.70 $\pm$ 0.31	20.7 $\pm$ 3.7	20.6	3.78 $\pm$ 0.20					3.78 $\pm$ 0.20	
34	0.57	0.261 $\pm$ 0.061	0.000716 $\pm$ 0.000063	0.0257 $\pm$ 0.0064	-311	4.61 $\pm$ 0.41	25.8 $\pm$ 6.4	27.8	3.49 $\pm$ 0.24					3.49 $\pm$ 0.24	
35	0.63	0.120 $\pm$ 0.015	0.000709 $\pm$ 0.000037	0.0117 $\pm$ 0.0016	-118	4.57 $\pm$ 0.24	11.8 $\pm$ 1.6	9.57	4.12 $\pm$ 0.19					4.12 $\pm$ 0.19	
36	3.34	0.119 $\pm$ 0.012	0.000660 $\pm$ 0.000032	0.0108 $\pm$ 0.0012	-123	4.26 $\pm$ 0.21	10.9 $\pm$ 1.2	9.40	3.87 $\pm$ 0.17					3.87 $\pm$ 0.17	
average															3.97 $\pm$ 0.20
weighted mean															3.933 $\pm$ 0.074
MSWD															6.68
YN4															
1	0.55	0.414 $\pm$ 0.035	0.000956 $\pm$ 0.000041	0.0545 $\pm$ 0.0052	-687	6.16 $\pm$ 0.26	53.9 $\pm$ 5.1	46.0	3.573 $\pm$ 0.088					3.573 $\pm$ 0.088	
2	0.64	0.132 $\pm$ 0.051	0.000772 $\pm$ 0.000049	0.0141 $\pm$ 0.0055	-67.7	4.98 $\pm$ 0.31	14.2 $\pm$ 5.6	10.8	4.37 $\pm$ 0.24					4.37 $\pm$ 0.24	
3	0.83	0.128 $\pm$ 0.045	0.000703 $\pm$ 0.000041	0.0124 $\pm$ 0.0044	-73.1	4.53 $\pm$ 0.26	12.5 $\pm$ 4.4	10.3	4.05 $\pm$ 0.22					4.05 $\pm$ 0.22	
4	0.83	0.148 $\pm$ 0.045	0.000758 $\pm$ 0.000044	0.0155 $\pm$ 0.0048	-115	4.88 $\pm$ 0.28	15.6 $\pm$ 4.9	12.8	4.21 $\pm$ 0.22					4.21 $\pm$ 0.22	
5	0.50	0.132 $\pm$ 0.018	0.000661 $\pm$ 0.000023	0.0120 $\pm$ 0.0017	-141	4.26 $\pm$ 0.15	12.1 $\pm$ 1.7	10.7	3.82 $\pm$ 0.12					3.82 $\pm$ 0.12	
6	0.32	0.157 $\pm$ 0.015	0.000716 $\pm$ 0.000023	0.0154 $\pm$ 0.0016	-200	4.61 $\pm$ 0.15	15.6 $\pm$ 1.6	13.8	3.97 $\pm$ 0.11					3.97 $\pm$ 0.11	
7	0.26	0.222 $\pm$ 0.023	0.000749 $\pm$ 0.000028	0.0229 $\pm$ 0.0025	-320	4.83 $\pm$ 0.18	23.0 $\pm$ 2.5	22.0	3.80 $\pm$ 0.11					3.80 $\pm$ 0.11	
8	0.67	0.376 $\pm$ 0.028	0.001126 $\pm$ 0.000043	0.0584 $\pm$ 0.0049	-624	7.26 $\pm$ 0.28	57.6 $\pm$ 4.8	41.3	4.110 $\pm$ 0.090					4.110 $\pm$ 0.090	
9	0.35	0.0851 $\pm$ 0.0099	0.000668 $\pm$ 0.000020	0.00784 $\pm$ 0.00094	-59.1	4.31 $\pm$ 0.13	7.93 $\pm$ 0.95	4.88	4.09 $\pm$ 0.11					4.09 $\pm$ 0.11	
10	0.33	0.094 $\pm$ 0.015	0.000634 $\pm$ 0.000021	0.0083 $\pm$ 0.0013	-68.7	4.09 $\pm$ 0.14	8.4 $\pm$ 1.3	6.06	3.84 $\pm$ 0.12					3.84 $\pm$ 0.12	
11	1.13	0.100 $\pm$ 0.024	0.000651 $\pm$ 0.000029	0.0089 $\pm$ 0.0022	-58.0	4.19 $\pm$ 0.19	9.0 $\pm$ 2.2	6.71	3.91 $\pm$ 0.16					3.91 $\pm$ 0.16	
12	0.98	0.100 $\pm$ 0.023	0.000710 $\pm$ 0.000031	0.0098 $\pm$ 0.0023	-61.8	4.58 $\pm$ 0.20	9.9 $\pm$ 2.3	6.74	4.24 $\pm$ 0.17					4.24 $\pm$ 0.17	
13	0.83	0.064 $\pm$ 0.020	0.000652 $\pm$ 0.000027	0.0057 $\pm$ 0.0018		4.20 $\pm$ 0.18	5.8 $\pm$ 1.8	2.20	4.10 $\pm$ 0.17					4.10 $\pm$ 0.17	

Table 2. Continued.

spot no.	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error	2σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error	2σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error	2σ	Disc*	^{238}U - ^{206}Pb age (Ma)	Error	2σ	$f(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})^{**}$ (%)	^{238}U - ^{206}Pb age*** (Ma)	Error	2σ
14	0.98	0.215 ± 0.036	0.000807 ± 0.000043		0.0239 ± 0.0042	-274		5.20 ± 0.27	24.0 ± 4.3	21.1		4.06 ± 0.17						
15	0.91	0.283 ± 0.031	0.000840 ± 0.000037		0.0328 ± 0.0038	-430		5.41 ± 0.24	32.7 ± 3.8	29.7		3.84 ± 0.12						
16	0.84	0.174 ± 0.036	0.000668 ± 0.000036		0.0160 ± 0.0034	-189		4.31 ± 0.23	16.1 ± 3.4	16.0		3.66 ± 0.17						
17	0.51	0.119 ± 0.024	0.000644 ± 0.000028		0.0106 ± 0.0022	-100		4.15 ± 0.18	10.7 ± 2.2	9.18		3.78 ± 0.15						
18	1.086	0.059 ± 0.010	0.000621 ± 0.000015		0.00505 ± 0.00088	-2.94		4.002 ± 0.099	5.1 ± 0.89	1.60		3.94 ± 0.10						
19	0.64	0.249 ± 0.061	0.000705 ± 0.000050		0.0242 ± 0.0061	-291		4.54 ± 0.32	24.2 ± 6.2	25.4		3.51 ± 0.19						
20	0.38	0.258 ± 0.031	0.000851 ± 0.000035		0.0303 ± 0.0039	-378		5.48 ± 0.22	30.3 ± 3.9	26.6		4.00 ± 0.12						
21	0.40	0.0587 ± 0.0069	0.000623 ± 0.000012		0.00504 ± 0.00060	-10.0		4.017 ± 0.080	5.1 ± 0.61	1.58		3.953 ± 0.078						
22	0.41	0.061 ± 0.013	0.000628 ± 0.000017		0.0053 ± 0.0011	-2.57		4.04 ± 0.11	5.4 ± 1.1	1.90		3.97 ± 0.11						
23	0.34	0.079 ± 0.017	0.000589 ± 0.000019		0.0064 ± 0.0014	-30.3		3.79 ± 0.12	6.5 ± 1.4	4.13		3.65 ± 0.11						
24	0.40	0.108 ± 0.018	0.000624 ± 0.000020		0.0093 ± 0.0016	-91.3		4.02 ± 0.13	9.4 ± 1.6	7.78		3.72 ± 0.11						
25	0.58	0.256 ± 0.064	0.000741 ± 0.000054		0.0262 ± 0.0068	-300		4.78 ± 0.35	26.2 ± 6.8	26.3		3.62 ± 0.20						
26	0.55	0.160 ± 0.044	0.000676 ± 0.000039		0.0149 ± 0.0042	-142		4.35 ± 0.25	15.0 ± 4.2	14.2		3.76 ± 0.19						
27	0.32	0.0673 ± 0.0085	0.000611 ± 0.000019		0.00567 ± 0.00074	-23.8		3.94 ± 0.12	5.7 ± 0.75	2.65		3.84 ± 0.12						
28	0.28	0.072 ± 0.011	0.000618 ± 0.000022		0.00610 ± 0.00099	-26.2		3.98 ± 0.14	6.2 ± 1.0	3.19		3.86 ± 0.13						
29	0.46	0.302 ± 0.039	0.000903 ± 0.000058		0.0375 ± 0.0054	-443		5.82 ± 0.37	37.4 ± 5.4	32.0		3.94 ± 0.17						
30	0.70	0.113 ± 0.020	0.000688 ± 0.000033		0.0107 ± 0.0020	-94.9		4.43 ± 0.21	10.8 ± 2.0	8.40		4.05 ± 0.18						
31	0.50	0.773 ± 0.116	0.00616 ± 0.00013		0.657 ± 0.020	-1154		39.59 ± 0.84	513 ± 15	91.1		3.8764 ± 0.0080						
32	0.59	0.267 ± 0.059	0.000936 ± 0.000091		0.0345 ± 0.0083	-324		6.03 ± 0.58	34.4 ± 8.3	27.7		4.23 ± 0.28						
33	0.52	0.228 ± 0.045	0.000731 ± 0.000059		0.0230 ± 0.0049	-277		4.71 ± 0.38	23.1 ± 5.0	22.8		3.70 ± 0.24						
34	1.076	0.748 ± 0.024	0.00534 ± 0.00014		0.551 ± 0.023	-1140		34.36 ± 0.92	446 ± 19	87.9		3.942 ± 0.012						
35	0.82	0.655 ± 0.040	0.00309 ± 0.00013		0.279 ± 0.021	-1059		19.91 ± 0.85	250 ± 19	76.3		4.08 ± 0.04						
average																	3.92 ± 0.14	
weighted mean																	3.888 ± 0.020	
MSWD																	9.62	
YNS																		
1	0.50	0.098 ± 0.016	0.000717 ± 0.000030		0.0097 ± 0.0017	-70.4		4.62 ± 0.19	9.8 ± 1.7	6.50		4.31 ± 0.17						
2	0.65	0.364 ± 0.093	0.000659 ± 0.000084		0.0331 ± 0.0095	-444		4.25 ± 0.54	33.1 ± 9.5	40.1		2.97 ± 0.26						
3	0.86	0.189 ± 0.043	0.000662 ± 0.000050		0.0173 ± 0.0041	-204		4.26 ± 0.32	17.4 ± 4.1	18.1		3.56 ± 0.22						
4	0.86	0.587 ± 0.043	0.001691 ± 0.000077		0.137 ± 0.012	-989		10.89 ± 0.49	130 ± 11	68.3		3.774 ± 0.058						
5	0.53	0.293 ± 0.038	0.000840 ± 0.000051		0.0339 ± 0.0049	-429		5.41 ± 0.33	33.8 ± 4.9	31.1		3.79 ± 0.16						
6	0.42	0.131 ± 0.017	0.000626 ± 0.000025		0.0113 ± 0.0015	-140		4.03 ± 0.16	11.4 ± 1.5	10.6		3.66 ± 0.13						
7	0.40	0.110 ± 0.016	0.000653 ± 0.000026		0.0099 ± 0.0015	-98.0		4.21 ± 0.17	10.0 ± 1.5	8.06		3.86 ± 0.14						
8	0.70	0.436 ± 0.043	0.000966 ± 0.000056		0.0580 ± 0.0067	-708		6.23 ± 0.36	57.3 ± 6.6	49.1		3.52 ± 0.11						
9	0.36	0.263 ± 0.032	0.000913 ± 0.000051		0.0331 ± 0.0045	-381		5.88 ± 0.33	33.1 ± 4.5	27.4		4.16 ± 0.16						
10	1.041	0.248 ± 0.048	0.000735 ± 0.000072		0.0252 ± 0.0054	-309		4.73 ± 0.46	25.2 ± 5.4	25.5		3.60 ± 0.28						
11	1.17	0.288 ± 0.039	0.000744 ± 0.000055		0.0295 ± 0.0045	-414		4.80 ± 0.36	29.5 ± 4.5	30.5		3.48 ± 0.19						
12	0.59	0.170 ± 0.034	0.000776 ± 0.000064		0.0181 ± 0.0040	-177		5.00 ± 0.41	18.2 ± 4.0	15.6		4.20 ± 0.28						
13	0.48	0.120 ± 0.018	0.000723 ± 0.000037		0.0119 ± 0.0019	-112		4.66 ± 0.24	12.0 ± 1.9	9.27		4.18 ± 0.20						
14	0.87	0.199 ± 0.040	0.000768 ± 0.000070		0.0211 ± 0.0047	-224		4.95 ± 0.45	21.2 ± 4.7	19.3		3.99 ± 0.30						
15	1.035	0.278 ± 0.051	0.000758 ± 0.000076		0.0291 ± 0.0061	-362		4.89 ± 0.49	29.1 ± 6.1	29.3		3.59 ± 0.26						
16	1.25	0.152 ± 0.014	0.000695 ± 0.000028		0.0146 ± 0.0015	-191		4.48 ± 0.18	14.7 ± 1.5	13.4		3.86 ± 0.14						
17	0.86	0.184 ± 0.027	0.000786 ± 0.000051		0.0200 ± 0.0032	-226		5.07 ± 0.33	20.1 ± 3.2	17.4		4.16 ± 0.22						
18	0.92	0.266 ± 0.027	0.000845 ± 0.000046		0.0310 ± 0.0036	-398		5.44 ± 0.30	31.0 ± 3.6	27.7		3.91 ± 0.16						
19	0.47	0.152 ± 0.028	0.000667 ± 0.000046		0.0140 ± 0.0027	-157		4.30 ± 0.30	14.1 ± 2.7	13.3		3.77 ± 0.22						
20	0.39	0.214 ± 0.060	0.000866 ± 0.000099		0.0255 ± 0.0077	-209		5.58 ± 0.64	25.6 ± 7.7	21.1		4.32 ± 0.38						
21	0.56	0.322 ± 0.041	0.001050 ± 0.000078		0.0466 ± 0.0068	-475		6.77 ± 0.50	46.2 ± 6.8	34.7		4.24 ± 0.20						
22	0.56	0.220 ± 0.045	0.000785 ± 0.000071		0.0238 ± 0.0053	-257		5.06 ± 0.46	23.9 ± 5.4	21.9		3.92 ± 0.28						
23	1.16	0.370 ± 0.034	0.001045 ± 0.000065		0.0534 ± 0.0059	-591		6.73 ± 0.42	52.8 ± 5.9	40.9		3.98 ± 0.15						
24	0.37	0.208 ± 0.017	0.000737 ± 0.000037		0.0211 ± 0.0020	-300		4.75 ± 0.24	21.2 ± 2.0	20.4		3.83 ± 0.15						

Table 2. Continued.

spot no.	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Error	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Error	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Error	Disc*	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ age	Error	$^{235}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ age	Error	$t(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb})^{**}$	$^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ age***	Error
			2 σ		2 σ		2 σ	(%)	(Ma)	2 σ	(Ma)	2 σ	(%)	(Ma)	2 σ
25	0.40	0.101 $\pm$ 0.015	0.000681 $\pm$ 0.000037	0.0095 $\pm$ 0.00015	-77.3	4.39 $\pm$ 0.24	9.6 $\pm$ 1.5	6.89	4.07 $\pm$ 0.20						
26	1.32	0.296 $\pm$ 0.043	0.000903 $\pm$ 0.000072	0.0368 $\pm$ 0.0061	-418	5.82 $\pm$ 0.46	36.7 $\pm$ 6.1	31.5	3.96 $\pm$ 0.22						
27	1.082	0.256 $\pm$ 0.042	0.000848 $\pm$ 0.000069	0.0299 $\pm$ 0.0054	-340	5.47 $\pm$ 0.44	29.9 $\pm$ 5.4	26.5	4.01 $\pm$ 0.24						
28	0.63	0.426 $\pm$ 0.023	0.001176 $\pm$ 0.000036	0.0691 $\pm$ 0.0043	-736	7.58 $\pm$ 0.23	67.8 $\pm$ 4.2	47.9	3.959 $\pm$ 0.062						
29	0.59	0.215 $\pm$ 0.036	0.000901 $\pm$ 0.000052	0.0267 $\pm$ 0.0047	-274	5.80 $\pm$ 0.33	26.7 $\pm$ 4.7	21.3	4.42 $\pm$ 0.19						
30	0.37	0.370 $\pm$ 0.041	0.000899 $\pm$ 0.000049	0.0459 $\pm$ 0.0057	-584	5.79 $\pm$ 0.32	45.5 $\pm$ 5.6	40.9	3.62 $\pm$ 0.12						
31	0.98	0.265 $\pm$ 0.056	0.000905 $\pm$ 0.000072	0.0331 $\pm$ 0.0075	-331	5.83 $\pm$ 0.47	33.1 $\pm$ 7.5	27.7	4.12 $\pm$ 0.24						
32	0.41	0.074 $\pm$ 0.021	0.000641 $\pm$ 0.000029	0.0065 $\pm$ 0.0019	-9.7	4.13 $\pm$ 0.19	6.6 $\pm$ 1.9	3.48	3.98 $\pm$ 0.17						
33	0.72	0.534 $\pm$ 0.037	0.001528 $\pm$ 0.000063	0.1125 $\pm$ 0.0090	-907	9.84 $\pm$ 0.41	108.2 $\pm$ 8.7	61.5	3.887 $\pm$ 0.064						
34	0.61	0.414 $\pm$ 0.052	0.00160 $\pm$ 0.00010	0.091 $\pm$ 0.013	-633	10.29 $\pm$ 0.67	89 $\pm$ 13	46.4	4.66 $\pm$ 0.14						
35	0.39	0.157 $\pm$ 0.013	0.000699 $\pm$ 0.000020	0.0151 $\pm$ 0.0013	-206	4.50 $\pm$ 0.13	15.2 $\pm$ 1.3	14.0	3.892 $\pm$ 0.096						
36	0.46	0.094 $\pm$ 0.013	0.000648 $\pm$ 0.000021	0.0084 $\pm$ 0.0012	-70.8	4.18 $\pm$ 0.14	8.5 $\pm$ 1.2	6.05	3.94 $\pm$ 0.12						
average															
weighted mean															
MSWD															
8.75															

* Degree of discordance (%); negative numbers and blanks show normal discordant and concordant within 2 σ of the analytical error, respectively.

** Percentage of degree of common Pb contamination.

*** Correction of common Pb was calculated using IsoplotR (Vermeesch, 2018).

分析した。本測定でモニターした同位体は ^{29}Si , ^{202}Hg , ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U である。 ^{29}Si は FT 年代決定の際に必要な U 定量の内標準として用いた。 Pb 同位体分別補正と U 定量のスタンダードとして NIST 発行のガラス標準試料 SRM610 を用い、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 比の分別補正としては 91500 ジルコン (Wiedenbeck et al., 1995) を用いた。その他の分析条件については基本的に Orihashi et al. (2008) に従った。本分析期間中に同時に測定したジルコンスタンダード OD-3 (岩野ほか, 2012) の 30 回の繰り返し測定での $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 年代値は加重平均で $32.40 \pm 0.21 \text{ Ma}$ (2 σ) であり、Iwano et al. (2013) の推奨値 ($33.0 \pm 0.1 \text{ Ma}$) と $\pm 2\%$ の範囲内で一致した。

2. FT 年代測定法

FT 年代測定は U-Pb 年代測定を行った 5 試料のうち、溶結凝灰岩試料 (YN1)、流紋岩試料 (YN2)、軽石試料 (YN3) の 3 試料について行った。U-Pb 分析されたジルコンマウントについて、KOH + NaOH 共溶液 (225°C, Gleadow et al., 1976) で 35 時間エッチングを行い、FT を検出した。次に U-Pb 年代分析点 (粒子の縁と中央) に近い部分において FT 密度分布が比較的均質な粒子を 9~13 粒選び、FT 密度測定を行った (Fig. 4)。FT 年代算出に必要なウラン濃度は、前述したように U-Pb 年代測定時の ^{238}U と ^{29}Si シグナルを用い、U 濃度は既知の NIST SRM610 (461.5 ppm; Jochum et al., 2011) を基準に求めた。U 濃度値の確かめは、平行して利用していた 91500 ジルコンの U 濃度値 (70~100 ppm) と、既報値 (Weidenbeck et al., 1995; Iwano et al., 2020) の一致性から確認した。FT 年代は Iwano et al. (2018, 2020) に従い、 ^{238}U の壊変定数を用いた絶対校正で 1 粒子ずつ求め、粒子年代の誤差は自発 FT 数の計数誤差と U 濃度の測定誤差 (20% と仮定) を伝搬させた。また試料ごとの代表値とその誤差は、粒子年代値の算術平均値およびそれから計算される標準誤差 (2SE) とした。

測定結果

1. U-Pb 年代

Table 2 に U-Pb 年代測定結果を示す。今回測定した 5 試料の結果は Tera-Wasserburg プロット図において、そのほとんどがコンコーディア曲線上から外れ、明瞭な common Pb の混染トレンドを示した (Fig. 5a, c, e, g, i)。そこで各試料の $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 年代の加重平均を算出する際、すべての測定結果に対してアイソクロン法による ^{207}Pb 補正を行った。Tera-Wasserburg プロットの作図および ^{207}Pb を用いた common Pb 補正、 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 年代の加重平均の計算には IsoplotR (Vermeesch, 2018) を用いた。

尾開山凝灰岩溶結凝灰岩相から採取した 2 試料のうち、同模式地である尾開山から採取した溶結凝灰岩試料 (YN1) については 46 個のジルコン粒子に対して計 68 スポットの分析結果を得た。同 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 年代の加重平均を算出する際、2 点が統計学的外れ値として除外され、その平均値は $8.730 \pm 0.077 \text{ Ma}$ (2 σ ; MSWD = 12.6) の年代値であった (Fig. 5a, b)。次に、同溶結凝灰岩相として採取した大仏公

Fig. 5. Tera-Wasserburg concordia diagrams of U-Pb zircon data and weighted mean ^{238}U - ^{206}Pb ages: (a), (b) rhyolitic welded tuff (YN1); (c), (d) rhyolite (YN2) from the welded tuff facies; (e), (f) pumice (YN3); (g), (h) pumice (YN4); and (i), (j) pumice (YN5) from the unwelded tuff facies of the Obirakiyama Tuff.

園内露頭の流紋岩試料 (YN2) については 62 個のジルコン粒子に対して計 70 スポットの分析結果を得た。同 ^{238}U - ^{206}Pb 年代の加重平均算出の際、3 点が統計学的外れ値として除外され、その平均値は $5.303 \pm 0.048 \text{ Ma}$ (2σ ; $\text{MSWD} = 4.3$) の年代値であった (Fig. 5c, d)。これらの結果は村岡 (1991) が推定した尾開山凝灰岩の噴出年代 (3.5 Ma) と有意に古い結果を示した。

尾開山凝灰岩非溶結凝灰岩相から採取した 3 試料のうち、白岩森林公園内露頭の軽石試料 (YN3) については 21 個のジルコン粒子に対して計 36 スポットの分析結果を得た。同 ^{238}U - ^{206}Pb 年代の加重平均値は $3.933 \pm 0.074 \text{ Ma}$ (2σ ; $\text{MSWD} = 6.68$) であった (Fig. 5e, f)。白岩東部露頭の軽石試料 (YN4) については 28 個のジルコン粒子に対して計 35 スポットの分析結果を得た。同 ^{238}U - ^{206}Pb 年代の加重平均算出の際、1 点が統計学的外れ値として除外され、その平均値は $3.888 \pm 0.020 \text{ Ma}$ (2σ ; $\text{MSWD} = 9.62$) の年代値であった (Fig. 5g, h)。長峰鯖野沢付近 (採石場) から採取した軽石試料 (YN5) については 23 個のジルコン粒子に対して計 36 スポットの分析結果を得た。同 ^{238}U - ^{206}Pb 年代の加

重平均算出の際、1 点が統計学的外れ値として除外され、その平均値は $3.865 \pm 0.069 \text{ Ma}$ (2σ ; $\text{MSWD} = 8.75$) の年代値であった (Fig. 5i, j)。このように非溶結凝灰岩相から採取した 3 試料の結果はそれぞれ誤差範囲で一致し 3.9 Ma 付近に集中した。また、村岡 (1991) が推定した尾開山凝灰岩の噴出年代 (3.5 Ma) と比べ若干古い結果であるが、K-Ar 年代結果の誤差を 2σ と換算すると誤差範囲で一致する。

2. FT 年代

Table 3 に FT 年代測定結果を示す。尾開山凝灰岩溶結凝灰岩相から採取した 2 試料 (溶結凝灰岩試料; YN1, 流紋岩試料; YN2) では、U-Pb 年代測定を行った 12~13 個のジルコン粒子からそれぞれ $8.5 \pm 1.1 \text{ Ma}$ (2SE) と $4.9 \pm 1.1 \text{ Ma}$ (2SE) が得られ、U-Pb 年代結果と誤差範囲で一致した (Fig. 6)。尾開山凝灰岩非溶結凝灰岩相を代表する白岩森林公園内露頭の軽石試料 (YN3) では、9 個のジルコン粒子を対象に FT 年代として $3.3 \pm 0.9 \text{ Ma}$ (2SE) が得られた。U-Pb 年代 (3.9 Ma) と比較して若干若い年代を示すものの FT 年代の誤差を 2σ に換算すると誤差範囲で一致する。

Fig. 5. Continued.

考 察

前述したように、本報で報告した尾開山凝灰岩から抽出したジルコンの U-Pb 年代と FT 年代のダブル年代測定の結果は誤差範囲で一致した。このことは尾開山凝灰岩起源の珧長質マグマ中のジルコンは晶出後直ちに急冷した熱履歴を経験したことを示唆し、得られたジルコンの U-Pb 年代は噴出年代と近似できる。また、今回得られた U-Pb 年代と FT

年代の分析精度は前者の方が良好であることから、以降の考察ではジルコンの U-Pb 年代結果を尾開山凝灰岩の噴出年代として採用する。

1. 尾開山凝灰岩の噴出年代

本報で得られた非溶結凝灰岩相軽石試料 3 試料のジルコン U-Pb 年代は 3.9 Ma に集中し、清水目川の軽石試料から得られた K-Ar 年代結果 (3.8 Ma; 村岡, 1991) と浪岡川中流域および六枚橋川上流に分布する大落前川層軽石凝灰岩

Table 3. Results of absolute zircon fission-track ages obtained from the Obirakiyama Tuff. N_s and ρ_s are the total number and density of spontaneous tracks, respectively. U_{ICP} is the uranium concentration from LA-ICP-MS analysis.

grain No	Fission Track Data			Absolute-FT Age			
	Ns	Area (10 ⁻⁶ cm ²)	ρ _s (10 ⁶ cm ⁻²)	NIST-based U _{ICP}	FT-Age (Ma)		
				(ppm)	±20%	t	±1SD
YN1							
2	29	12.0	2.42	560	112	7.9	2.2
3	65	28.0	2.32	537	107	7.9	1.9
5	59	16.0	3.69	928	186	7.3	1.7
7	15	7.0	2.14	379	76	10.4	3.4
8	62	10.0	6.20	1159	232	9.8	2.3
11	80	16.0	5.00	985	197	9.3	2.1
13	17	16.0	1.06	233	47	8.4	2.6
14	30	12.0	2.50	661	132	6.9	1.9
16	62	12.0	5.17	1246	249	7.6	1.8
17	22	8.0	2.75	667	133	7.6	2.2
18	39	20.0	1.95	458	92	7.8	2.0
20	36	20.0	1.80	236	47	14.0	3.6
21	33	14.0	2.36	725	145	6.0	1.6
				n	13		
				Average	8.5		
				SD	2.0		
				2SE	1.1		
YN2							
1	53	16.0	3.31	1392	278	4.4	1.1
2	13	5.0	2.60	1284	257	3.7	1.3
10	15	9.0	1.67	1496	299	2.0	0.7
11	51	6.0	8.50	2173	435	7.2	1.8
13	25	8.0	3.13	2054	411	2.8	0.8
15	24	9.0	2.67	629	126	7.8	2.2
19	14	6.0	2.33	942	188	4.5	1.5
22	14	6.0	2.33	787	157	5.4	1.8
26	31	6.0	5.17	1289	258	7.4	2.0
27	49	9.0	5.44	2692	538	3.7	0.9
36	12	4.0	3.00	932	186	5.9	2.1
47	10	6.0	1.67	680	136	4.5	1.7
				n	12		
				Average	4.9		
				SD	1.8		
				2SE	1.1		
YN3							
1	8	21.0	0.38	415	83	1.7	0.7
2	12	15.0	0.80	261	52	5.6	2.0
3	9	16.0	0.56	457	91	2.3	0.9
4	7	15.0	0.47	179	36	4.8	2.0
6	8	10.0	0.80	354	71	4.2	1.7
7	23	16.0	1.44	799	160	3.3	1.0
8	14	10.0	1.40	875	175	2.9	1.0
10	20	12.0	1.67	1483	297	2.1	0.6
12	25	30.0	0.83	531	106	2.9	0.8
				n	9		
				Average	3.3		
				SD	1.3		
				2SE	0.9		

N_s and ρ_s : Total number and density of spontaneous tracks.

U_{ICP} : Uranium concentration via LA-ICP-MS analysis.

から得られた K-Ar 年代結果 (4.2~3.8 Ma; 根本, 1988) と誤差範囲で一致する。一方, 村岡 (1991) が小国北西部と法峠から報告した 2 試料の K-Ar 年代 (3.0~2.5 Ma) と比べ明らかに古い年代を示した (Fig. 7)。ジルコンの U-Pb 年代が噴出年代より見かけ上古い年代を示す可能性として, 測定

したジルコンがすべて外来ジルコンからなる場合 (例えば, 檀原ほか, 2005) が考えられるが, 前述したように本報では FT 年代と U-Pb 年代のダブル年代測定を実施しており, この可能性は完全に否定される。村岡 (1991) が報告した 3 試料の K-Ar 年代結果を精査すると法峠から採取した軽石試料のカリウム濃度は 1.96~1.98 wt% であり, 他の 2 試料 (2.44~2.67 wt%) に比べて極端に低く, また, ^{40}Ar の大気混入率も 90% 以上であった。このことから, K-Ar 年代結果のうち 3.0~2.5 Ma を示した 2 試料は多かれ少なかれ風化変質 (二次的影響による Ar 損失) のために若返りを経験したと解釈できる。一方, ジルコンの U-Pb 年代は仮に本報で取り扱った軽石試料が風化変質していたとしてもジルコンの化学特性からその効果は無視できる。以上から, 尾開山凝灰岩非溶結凝灰岩相の噴出年代は 3.9 Ma と結論した。なお, 長森ほか (2013) はカリウム濃度の特徴から, 法峠の軽石凝灰岩が虹貝凝灰岩 (2.5 Ma; 村岡, 1991) に対比される正平津川軽石質火山砕屑岩であるとした。これについては今後, 噴出年代の再検討を含め議論の余地がある。

溶結凝灰岩相について, 村岡 (1991) は湯ノ沢カルデラ東縁に位置する上横前沢から黒雲母と全岩 K-Ar 年代を報告している。本報は村岡 (1991) と同じ露頭から試料を採取していないものの, 湯ノ沢カルデラ北縁に位置する大仏公園から同溶結凝灰岩相の流紋岩試料を採取し, 5.306 ± 0.048 Ma (2 σ) の U-Pb 年代値を得た。この結果は村岡 (1991) の黒雲母 K-Ar 年代 (5.45 Ma) と誤差範囲で一致しており, 少なくとも上横前沢と大仏公園付近に分布する溶結凝灰岩相の噴出年代は 5.3 Ma であると言える (Fig. 7)。むしろ, 村岡 (1991) が報告した全岩 K-Ar 年代 (3.55 Ma) の方が風化変質による Ar 損失のため見かけ上若くなったと解釈できる。村岡 (1991) もまた同一露頭から採取した試料の K-Ar 年代法における全岩と黒雲母年代に有意な年代差があることについて今後検討の余地がある点は指摘している。しかし尾開山凝灰岩から得られたその他の K-Ar 年代結果が概ね 3.5 Ma であったことから同全岩 K-Ar 年代結果 (3.55 Ma) を尾開山凝灰岩の噴出年代とした。これは広域地質調査において非溶結凝灰岩相と溶結凝灰岩相がほぼ同時期の湯ノ沢カルデラ主要噴出物であるとする村岡・長谷 (1990) の結論に基づくものである。

以上のように, 本報と先行研究の年代測定結果から少なくとも湯ノ沢カルデラ北縁と東縁に分布する溶結凝灰岩相の噴出年代は 5.3 Ma であることが明らかになった。しかしながら, 本報では湯ノ沢カルデラ周辺に広範囲に分布するすべての溶結凝灰岩相が 5.3 Ma であると論ずる十分な結果は得られていない。例えば, 内町沢 (カルデラ南西部) の溶結凝灰岩相から採取した試料において 3.8 ± 0.3 Ma (1 σ) という全岩 K-Ar 年代結果が報告されている (金属鉱業事業団, 1980)。これは本報の非溶結凝灰岩相の噴出年代が 3.9 Ma であるとする結論と誤差範囲で一致する結果であり, 村岡・長谷 (1990) が論ずるように尾開山凝灰岩において非溶結凝灰岩相と同時期の溶結凝灰岩相が存在する可能性を示唆する (Fig. 7)。今後, 溶結凝灰岩相が分布するその他の地域につ

Fig. 6. Comparison of U-Pb and FT ages determined in this study for samples from the Obirakiyama Tuff.

Fig. 7. Comparison of U-Pb ages (this study) and K-Ar ages (previous research) from the Obirakiyama Tuff.

いて試料の系統採取を行い、本報と同様の同一ジルコンにおける U-Pb・FT ダブル年代測定を実施することで、同噴出年代が 5.3 Ma のみなのか、あるいは 5.3 Ma と 3.9 Ma の 2 つの噴出ステージが存在するか検討する必要がある。

村岡 (1991) は尾開山凝灰岩溶結凝灰岩相について自然残留磁化方位の測定を野外で実施しており、その結果はすべての溶結凝灰岩が逆帯磁であったことを報告している。ギルバート逆磁極期は 5.89~3.58 Ma (Merrill et al., 1998) であり、同溶結凝灰岩相の噴出年代が 5.3 Ma あるいは 5.3 Ma と 3.9 Ma のどちらかであったとしても自然残留磁化方位の測定結果とは矛盾しない。

2. 尾開山凝灰岩溶結凝灰岩相の分布域

本報において年代測定を行った尾開山凝灰岩溶結凝灰岩相

2 試料のうち、同凝灰岩模式地である尾開山中腹から採取した溶結凝灰岩試料の噴出年代は 8.7 Ma であった。これは前述した大仏公園付近に分布する同溶結凝灰岩相の年代よりもさらに 3 百万年以上古い結果であり、5 万分の 1 図幅「黒石」(村岡・長谷, 1990) において尾開山凝灰岩下位の下部中新統に対比される。尾開山中腹の試料採取地点の標高は 307 m であり、尾開山凝灰岩溶結凝灰岩相が分布する尾開山北東山麓の大仏公園付近(標高 97 m)と比べ 210 m の標高差がある。このことから尾開山山体は大部分が下部中新統に対比される溶結凝灰岩層から構成され、少なくとも同山麓周辺に分布する尾開山凝灰岩溶結凝灰岩相は後期中新世溶結凝灰岩層にアバットしていると考えられる。以上のように村岡・長谷 (1990) が示した同溶結凝灰岩相の分布域には今回のような

後期中新世溶結凝灰岩層の分布域が混在している可能性があり、再検討が必要となるかもしれない。

謝 辞

本研究を行うにあたり弘前大学の柴 正敏名誉教授には鏡下観察において多くのご助言を頂いた。弘前大学・岩石鉱物学ゼミの学生の方々には試料採取および図表の作成において多くのご助力・ご助言を頂いた。徳島大学の安間 了教授には英文要旨作成において有益なご助言を頂いた。愛知教育大学の星 博幸教授には本特集号に投稿する機会を与えていただいた。また、本特集号編集員の細井 淳博士および査読者の伊藤久敏博士、匿名の方には有益なご助言をいただいた。記して謝意を表する。

文 献

- Bernet, M., 2009, A field-based estimate of the zircon fission-track closure temperature. *Chem. Geol.*, **259**, 181–189.
- Cherniak, D. J. and Watson, E. B., 2000, Pb diffusion in zircon. *Chem. Geol.*, **172**, 5–24.
- 檀原 徹・星 博幸・岩野英樹・吉岡 哲・折橋裕二, 2005, 青森県津軽地方に分布する権現崎層溶結凝灰岩のフィッション・トラック年代. 地質雑, **111**, 476–487. [Danhara, T., Hoshi, H., Iwano, H., Yoshioka, T. and Orihashi, Y., 2005, Fission track ages of welded tuffs of the Gongenzaki Formation in the Tsugaru district, Aomori Prefecture, northeast Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **111**, 476–487.]
- Gleadow, A. J. W., Hurford, A. J. and Quaife R. D., 1976, Fission track dating of zircon: Improved etching techniques. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **33**, 273–276.
- Hurford, A. J., 1986, Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps South Central Switzerland and an age of vertical movement on the Insubric fault line. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **92**, 413–427.
- Iwano, H., Danhara, T., Danhara, Y., Hirabayashi, S., Nakajima, T., Sakai, H. and Hirata, T., 2020, Zircon fission-track and U–Pb double dating using femtosecond laser ablation–inductively coupled plasma–mass spectrometry: A technical note. *Isl. Arc.*, **29**, doi.org/10.1111/iar.12348.
- Iwano, H., Danhara, T. and Hirata, T., 2018a, Standardless fission-track ages of the IUGS age standards. *Chem. Geol.*, **488**, 87–104.
- Iwano, H., Danhara, T. and Hirata, T., 2018b, Erratum to “Standardless fission-track ages of the IUGS age standards” [*Chemical Geology* **488** (5th June 2018) pages 87–104]. *Chem. Geol.*, **491**, 48–54.
- 岩野英樹・折橋裕二・檀原 徹・平田岳史・小笠原正継, 2012, 同一ジルコン結晶を用いたフィッション・トラックとU–Pbダブル年代測定法の評価—島根県川本花崗閃緑岩中の均質ジルコンを用いて—. 地質雑, **118**, 365–375. [Iwano, H., Orihashi, Y., Danhara, T., Hirata, T. and Ogasawara, M., 2012, Evaluation of Fission-track and U–Pb double dating method for identical zircon grains: Using homogeneous zircon grains in Kawamoto Granodiorite in Shimane Prefecture, Japan. *J. Geol. Soc. Japan*, **118**, 365–375.]
- Iwano, H., Orihashi, Y., Hirata, T., Ogasawara, M., Danhara, T., Horie, K., Yamamoto, K., 2013, An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as a secondary U–Pb dating standard. *Isl. Arc.*, **22**, 382–394.
- Jochum, K. P., Weis, U., Stoll, B., Kuzmin, D., Yang, Q., Raczek, I., Enzweiler, J., 2011, Determination of reference values for NIST SRM 610–617 glasses following ISO Guidelines. *Geostand. Geoanal. Res.*, **35**, 397–429.
- 兼岡一郎, 1998, 年代測定概論. 東京大学出版会, 315p. [Kaneoka, I., 1998, *Numerical Dating*, Univ. Tokyo Press, 315p.]
- 金属鉱業事業団, 1980, 昭和 54 年度精密調査報告書, 北鹿地域, 160p. [Metal Mining Agency of Japan, 1980, *1980 precision survey report, Hokuroku district, Japan*. Metal Min. Agency Japan, 160p.] *
- Kudo, T., Sasaki, M., Uchiyama, Y., Nozawa, A., Sasaki, H., Tokizawa, T. and Takarada, S., 2007, Petrological variation of large-volume felsic magmas from Hakkoda-Towada caldera cluster: Implications for the origin of high-K felsic magmas in the Northeast Japan Arc. *Isl. Arc.*, **16**, 133–155.
- Makino, Y., Kuroki, Y. and Hirata, T., 2019, Determination of major to trace elements in metallic materials based on the solid mixing calibration method using multiple spot-laser ablation-ICP-MS. *J. Anal. At. Spectrom.*, **34**, 1794–1799.
- Merrill, R. T., McElhinny, M. W. and McFadden, P. L., 1998, *The Magnetic Field of the Earth: Paleomagnetism, the Core, and the Deep Mantle*. Academic Press, San Diego, 531p.
- 村岡洋文, 1991, 八甲田地熱地域の熱源系. 地調報告 **275**, 113–134. [Muraoka, H., 1991, Heat source systems in the Hakkoda geothermal field, Northeast Japan. *Rep. Geol. Surv. Japan*, **275**, 113–34.]
- 村岡洋文・長谷紘和, 1990, 黒石地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 124p. [Muraoka, H. and Hase, H., 1990, *Geology of the Kuroishi district*. Quadrangle Series, 1: 50,000. *Geol. Surv. Japan*, 124p.]
- 村岡洋文・高倉伸一, 1988, 10 万分の 1 八甲田地熱地域地質図説明書. 特殊地質図 21–4, 地質調査所, 27p. [Muraoka, H. and Takakura, S., 1988, *Geological Map of Hakkoda Geothermal Area, Scale 1: 100 000*. Miscellaneous Map Series, 21–4, *Geol. Surv. Japan*, 27p.]
- 村岡洋文・山口 靖・長谷紘和, 1991, 八甲田地熱地域で見出されたカルデラ群. 地調報告, **275**, 97–111. [Muraoka, H., Yamaguchi, Y. and Hase, H., 1991, Clustered calderas found in the Hakkoda geothermal field, Northeast Japan. *Rep. Geol. Surv. Japan*, **275**, 97–111.]
- 長森英明・宝田晋治・吾妻 崇, 2013, 青森西部地域の地質. 地域地質研究報告(5 万分の 1 地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 67p. [Nagamori, H., Takarada, S. and Azuma, T., 2013, *Geology of the Aomori-Seibu District*. Quadrangle Series, 1: 50,000, *Geol. Surv. Japan*, AIST, 67p.]
- 根本直樹, 1998, 浪岡町およびその周辺から得られたカリウム–アルゴン年代, 浪岡町史研究年報, no. 3, 53–61. [Nemoto, N., 1998, K–Ar ages obtained from Namioka Town and its surroundings. *Namioka Town Hist. Res. Annu. Rep.*, **3**, 53–61.] *
- Orihashi, Y., Anma, R., Motoki, A., Haller, M. J., Hirata, D., Iwano, H., Ramos, V. A., 2013, Evolution history of the crust underlying Cerro Pampa, Argentine Patagonia: Constraint from LA-CPMS U–Pb ages for exotic zircons in the Mid-Miocene adakite. *Geochem. J.*, **47**, 235–247.
- Orihashi, Y., Nakai, S. and Hirata, T., 2008, U–Pb age determination for seven standard zircons using inductively coupled plasma – mass spectrometry coupled with frequency quintupled Nd-YAG($\lambda=213$ nm) laser ablation system: comparison with LA-ICP-MS zircon analyses with a NIST glass reference material. *Resour. Geol.*, **58**, 101–123.
- 佐々木実, 2016, 八甲田–十和田カルデラ群火砕流堆積物の鉱物組成分布. 日本火山学会講演予稿集, 2016巻, 85p. [Sasaki, M., 2016, Mineral compositional distribution of pyroclastic flow deposits from Hakkoda-Towada caldera cluster. *Volcanol. Soc. Japan Meet., Abstr.*, 2016, 85.]
- Tagami, T., Hasebe, N. and Shimada, C., 1995, Episodic exhumation of accretionary complexes: Fission-track thermochronologic evidence from the Shimanto Belt and its vicinities, southwest Japan. *Isl. Arc.*, **4**, 209–230.
- 内山祥弘・佐々木実, 1999, 湯ノ沢カルデラ噴出物の岩石学的特徴. 日本火山学会講演予稿集, 1999. 2 巻. 103p. [Uchiyama, Y. and Sasaki, M., 1999, Petrology of Yunosawa caldera vol-

- canics. *Volcanol. Soc. Japan Meet., Abstr.*, 1999. 2, 103.]
 Vermeesch, P., 2018, IsoplotR: a free and open toolbox for geochronology. *Geosci. Front.*, **9**, 1479–1493.
 Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., Griffin, W. L., Meier, M., Oberli, F., Spiegel, W., 1995, Three natural zircon standards for U–Th–Pb, Lu–Hf, trace element and REE analyses. *Geostand. Geoanal. Res.*, **19**, 1–23.
 山元孝広, 2015, 日本の主要第四紀火山の積算マグマ噴出量階段図. 地質調査総合センター研究資料集, 613, 産総研地質調査総合センター. [Yamamoto, T., 2015, *Cumulative Volume Step-diagrams for Eruptive Magmas from Major Quaternary Volcanoes in Japan*. GSJ Open-File Report, 613, Geol. Surv. Japan, AIST.]
 Yokoyama, T. D., Suzuki, T., Kon, Y. and Hirata, T., 2011, Determinations of rare earth element abundance and U–Pb age of zircons using multispot laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Anal. Chem.*, **83**, 8892–8899.

*English translation from the original written in Japanese.

以下の Appendix は、オープンファイルとして学会ホームページ上で公開しています。 <<http://www.geosociety.jp/publication/content0006.html>>

Table A1. Results of K–Ar age dating of the Obirakiyama

Tuff, Yunosawa Caldera. Data sources: 1) Muraoka and Hase (1990); 2) Muraoka (1991); 3) Metal Mining Agency of Japan (1980); and 4) Nemoto (1998).

Fig. A1. Particle size distributions of zircon crystals recovered from five samples of the Obirakiyama Tuff, Yunosawa Caldera.

(著者プロフィール)

田口春那 弘前大学大学院理工学研究科地球環境防災コース博士前期課程 2 年。19 年 弘前大学理工学部卒。本研究では、試料採取、U–Pb 年代測定および原稿執筆を担当。E-mail: h19ms402@hirosaki-u.ac.jp.

折橋裕二 弘前大学大学院理工学研究科教授。97 年北海道大学大学院理学研究科博士後期課程修了。博士(理学), 18 年から現職。試料採取と原著執筆および総括を担当。E-mail: oripachi@hirosaki-u.ac.jp.

佐々木 実 弘前大学大学院理工学研究科講師。本研究では、試料採取と原著執筆を担当。E-mail: minoru@hirosaki-u.ac.jp.

宮嶋佑典 産業技術総合研究所地質調査総合センター。本研究では、U–Pb 年代測定と年代値の評価を担当。E-mail: yusuke.miyajima@aist.go.jp.

岩野英樹 株式会社京都フィッシュン・トラック。本研究では、FT 年代測定と原著執筆を担当。E-mail: iwano_hide@zeus.conet.ne.jp.

平田岳史 東京大学大学院理学系研究科附属地殻化学実験施設教授。本研究では U–Pb 年代値の評価と全体の総評を担当。E-mail: hrt1@eqchem.s.u-tokyo.ac.jp.

(要 旨)

田口春那・折橋裕二・佐々木実・宮嶋佑典・岩野英樹・平田岳史, 2021, 青森県南部, 湯ノ沢カルデラ噴出物である尾開山凝灰岩の高精度・高確度噴出年代の決定: 同一ジルコン U–Pb 年代とフィッシュン・トラック年代のダブル年代測定. 地質雑, **127**, 545–561. (Taguchi, H., Orihashi, Y., Sasaki, M., Miyajima, Y., Iwano, H. and Hirata, T., 2021, Determination of highly precise and accurate eruptive age of Obirakiyama Tuff, ejecta from Yunosawa Caldera, southern Aomori Prefecture: Its zircon U–Pb and fission-track double dating. *J. Geol. Soc. Japan*, **127**, 545–561.)

八甲田–十和田カルデラ群, 湯ノ沢カルデラから噴出した尾開山凝灰岩は陸成の溶結凝灰岩相と海成の非溶結凝灰岩相からなる。本研究では各相から採取した 5 試料についてジルコンの U–Pb・FT ダブル年代測定を行った。非溶結凝灰岩相の 3 試料の U–Pb 年代値は 3.9 Ma に集中したが, 溶結凝灰岩相のうち同凝灰岩の模式地である尾開山中腹の試料は 8.7 Ma, 大仏公園の黒曜岩試料は 5.3 Ma の U–Pb 年代を示した。これら U–Pb 年代結果はダブル年代測定で得た FT 年代と誤差範囲で一致することから高精度・高確度噴出年代を決定することができた。これにより, 尾開山凝灰岩非溶結凝灰岩相の噴出年代が 3.9 Maであることを確定した。一方, 流紋岩(溶結凝灰岩相)から得られた 5.3 Ma の年代値もまた尾開山凝灰岩の噴出年代を示すと考えられるが, 3.9 Ma に噴出した溶結凝灰岩相がある可能性は否定できない。さらに, 尾開山山体の溶結凝灰岩(8.7 Ma)は後期中新統に対比される。同溶結凝灰岩相の噴出年代と分布域については今後検討を要する。

科学論文では, 学説の検証可能性を保証することが重要です。そのため, 地質学雑誌掲載論文には, 重要な証拠となった試料がどこで得られたかを示しているものがあります。言うまでもないことですが, 見学や採取を行う場合, 各自の責任において地権者や関係官庁への連絡と許可の取得の必要があることにご注意下さい。詳しくは, 以下のサイトをご覧ください。

<http://www.geosociety.jp/publication/content0073.html>

一般社団法人日本地質学会