

秋田県角館町東方, 奥羽脊梁山脈に分布する真昼川層の年代

細井 淳^{1,*}・工藤 崇¹・岩野 英樹²・檀原 徹²・平田 岳史³

Jun Hosoi, Takashi Kudo, Hideki Iwano, Tohru Danhara and Takafumi Hirata (2019) The age of the Mahirugawa Formation distributed in the Ou Backbone Range, the east of Kakunodate Town, Akita Prefecture, northeast Japan. *Bull. Geol. Surv. Japan*, vol. 70 (4), p.315–326, 6 figs, 2 tables, 2 appendices.

Abstract: The Miocene strata widely distributed in the Ou Backbone Range on the east of the Kakunodate Town are mainly composed of volcanic rocks, whose geochronological data are very few. In this study, we conducted U-Pb and FT double dating of zircons obtained from the lower and upper part of the Miocene Mahirugawa Formation. The lower Mahirugawa Formation is dated at 13.2 ± 0.6 Ma and the upper is dated at 13.7 ± 0.3 Ma. The result shows that the boundary age of the Mahirugawa Formation and the younger Uchizawagawa Formation is ca. 14–13 Ma. Judging from their age and lithofacies, they seem to be correlated with the Nishikurosawa Formation in the standard stratigraphic succession in the Akita area.

Keywords: Miocene, fission-track dating, U-Pb dating, zircon, Ou Backbone Range, Mahirugawa Formation, Kakunodate, northeast Japan

要 旨

秋田県角館町東方の奥羽脊梁山脈には, 火山岩を主体とした中新統が広く分布するが, それらから年代指標データはほとんど得られていない。本論では中新統のうち, 真昼川層の下部と上部から試料を採取し, 同一ジルコンを用いたU-Pb・FTダブル年代測定を行った。その結果, 下部からは 13.2 ± 0.6 Ma, 上部からは 13.7 ± 0.3 MaのU-Pb年代値が得られた。真昼川層と上位の内沢川層との境界は14～13 Ma頃である。年代測定結果と真昼川層及び上位の内沢川層の岩相から, 両層ともに秋田地域標準層序の西黒沢層に対比されると考えられる。

1. はじめに

東北日本には, 古第三紀～新第三紀中期中新世の火山岩を主体とした地層, いわゆるグリーンタフが広域に分布する。グリーンタフは日本海拡大期の地層である。日本海拡大期の地質構造発達史を考察するためには, まず, 各地で精確な年代に基づくグリーンタフの層序を構築する必要がある。その層序を広域的に対比することで, はじめて日本海拡大に伴った広域的な3次元の島弧変遷史

を構築することが可能になる。1990年頃には当時の最新の層序対比を基に, 日本海拡大期の地質構造発達史が考察された(例えば, 天野・佐藤, 1989; Sato and Amano, 1991)。近年では, 鹿野(2018)が各地の最新の層序をまとめ, それを基に日本海拡大期の地質構造発達史を検討している。

グリーンタフは続成作用や変質作用を被り, かつ火山岩を主体としているため, 微化石による年代決定が難しい。古くから岩相層序が構築されてきたものの, その年代については曖昧なものが多い。近年, グリーンタフの年代決定には, U-Pb年代測定が有用であることが示されている(例えば, 星ほか, 2016; 細井ほか, 2018)。近年の放射年代測定技術を用いれば, これまで精確に求められなかったグリーンタフの年代を求めることが可能となる。

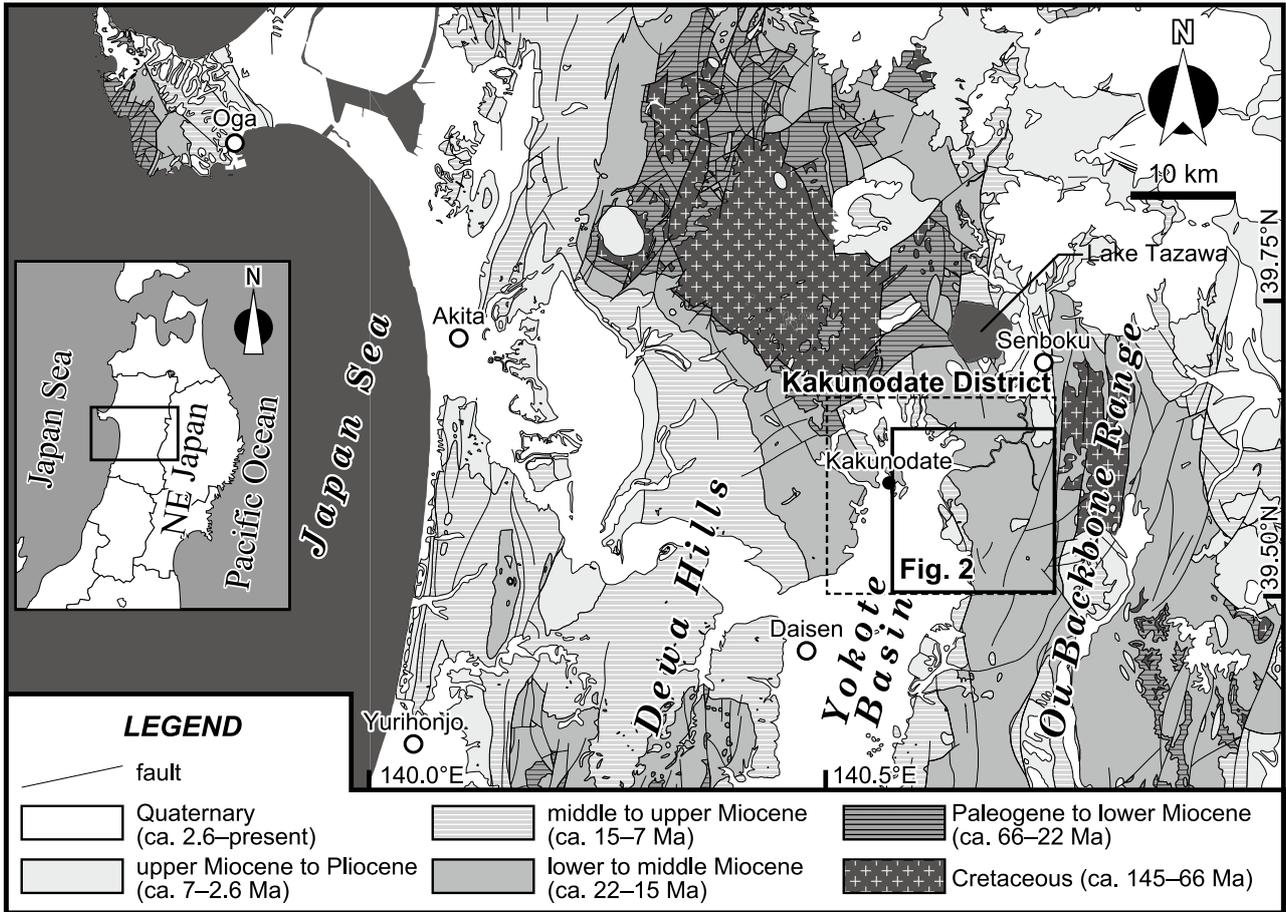
産業技術総合研究所地質調査総合センターでは, 現在, 5万分の1地質図幅「角館」の整備を進めている。その範囲内には, いわゆるグリーンタフと呼ばれる中新統が広く分布する(第1図)。そのうち, 奥羽脊梁山脈に分布する中新統は下位から順に八滝沢層, 真昼川層, 内沢川層, 真木層に区分され(第2図), 八滝沢層と真昼川層は不整合関係, その他は整合な関係とされている(臼田ほ

¹ 産業技術総合研究所地質調査総合センター地質情報研究部門(AIST, Geological Survey of Japan, Research Institute of Geology and Geoinformation)

² 株式会社京都フィッション・トラック(Kyoto Fission-Track Co., Ltd., Minamitajiricho 44-4, Omiya, Kita-ku, Kyoto 603-8832, Japan)

³ 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 University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033 Japan)

* Corresponding author: J. Hosoi, Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki, 305-8567 Japan, E-mail: j.hosoi@aist.go.jp



第1図 秋田県中央部付近の地質図(脇田ほか, 2009を一部修正). 破線は5万分の1地質図幅「角館」の範囲を示す.

Fig. 1 Simplified geological map of the central part of Akita Prefecture, northeast Japan (after Wakita *et al.*, 2009). Dotted square shows the Kakunodate District of 1:50,000 scale quadrangle series.

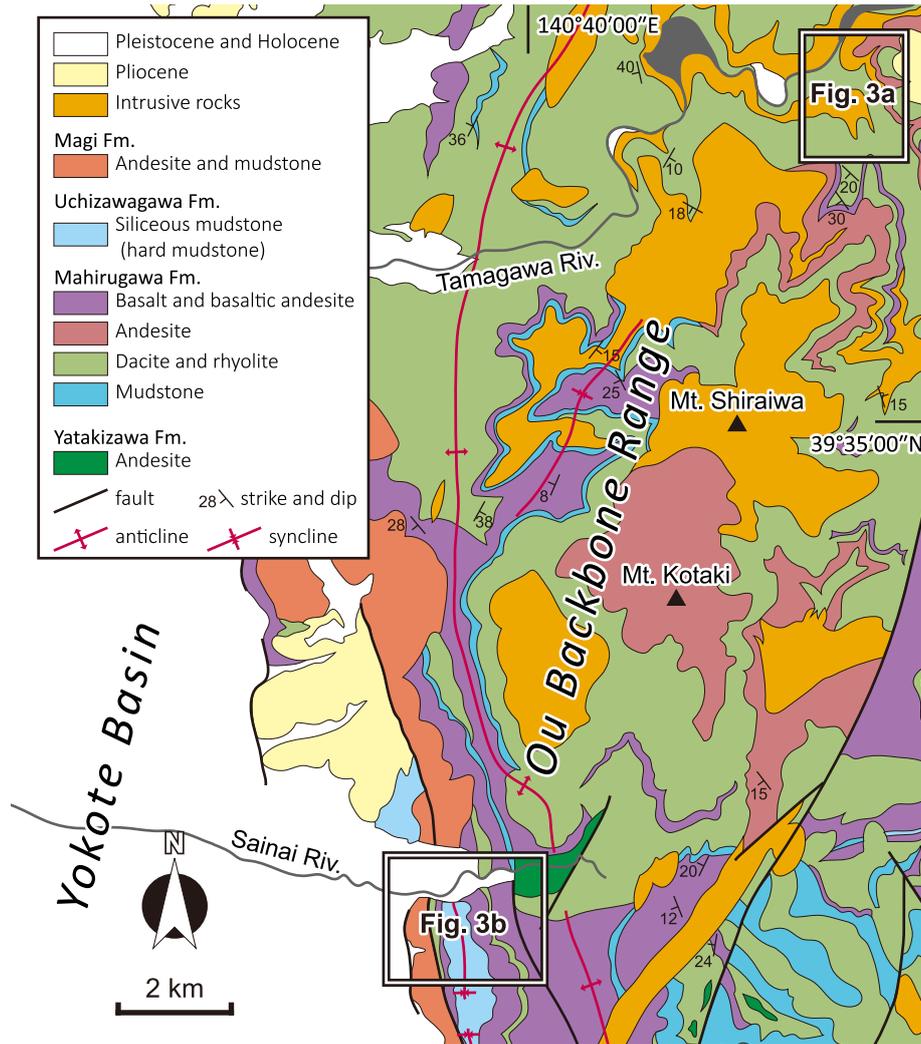
か, 1980). 臼田ほか(1980)はこれらを西隣の刈和野地域の層序と対比し, 男鹿半島や秋田市周辺の層序を基に構築された秋田地域標準層序(例えば, 池辺, 1962; 佐賀, 1992)との対応関係については, 岩相の類似から八滝沢層が門前層に, 真昼川層が西黒沢層に, 内沢川層が女川層に, そして真木層が船川層に対比されると考えた. このうち西黒沢層と女川層の境界は, 背弧域の火山活動終了と珪質泥岩の堆積開始時期にほぼ相当し, 日本海拡大~拡大後の地質構造発達史を検討する上で重要な地層境界である. しかし, 奥羽脊梁山脈の中新統は年代データが乏しく, 各地層そのものの年代が不明確である. 秋田地域標準層序との対比には, 岩相のみならず, 年代データも含めて検討する必要がある.

そこで今回, 真昼川層の年代を明らかにすることを目的として, U-Pb, FT(フィッシュョン・トラック)年代測定を実施した. 本論では, その結果を報告するとともに, 真昼川層の年代を推定し, 真昼川層の年代と岩相から秋田地域標準層序との対比を検討する.

2. 年代測定試料採取地周辺の地質

年代測定試料採取地付近の中新統は, 下位より八滝沢層, 真昼川層, 内沢川層, 真木層から構成される(第2図). 本論で年代測定対象とした真昼川層は, 玄武岩~流紋岩に及ぶ幅広い組成の火山岩を主体とし(第2図). 砂岩や泥岩を挟在する. 内沢川層は珪質泥岩(臼田ほか, 1980は硬質泥岩と記載)を主体とし, 厚さ数cmの細粒凝灰岩薄層をわずかに挟む(臼田ほか, 1980). 内沢川層は真昼川層を整合に覆う.

本研究では, 5万分の1地質図幅「角館」を整備する中で得た真昼川層の層厚と分布などのデータと先行研究のデータ(臼田ほか, 1980)を踏まえて, 調査地域に露出する真昼川層のなるべく下部(夏瀬ダム南の小玉沢周辺)と上部(齊内川南の奥羽脊梁山脈西縁)から試料を採取し, 年代測定を行った. それぞれの地点のルートマップを第3図に示し, 以下にその概要を記す.



第2図 角館町東方，奥羽脊梁山脈の地質図（臼田ほか，1980と秋田県，1989を一部修正）。

Fig. 2 Geological map of the Ou Backbone Range to the east of Kakunodate Town (partly modified from the geological map of Usuda *et al.*, 1980 and Akita Prefecture, 1989).

2.1 夏瀬ダム南(真昼川層下部)

この地域では，斑状安山岩溶岩及び同質火山碎屑岩 (pa)，多源礫火山碎屑岩 (vc)，凝灰質砂岩～泥岩 (sm)，デイサイト～流紋岩火山碎屑岩 (dr2) が分布し，これらを玄武岩～安山岩及びドレライト貫入岩 (ir) とデイサイト～流紋岩貫入岩 (dr1) が貫く (第3図a)。概略的には，安山岩溶岩及び同質火山碎屑岩，多源礫火山碎屑岩，凝灰質砂岩が互層して分布し，それらを珪長質火山碎屑岩が被覆する (第3図a)。

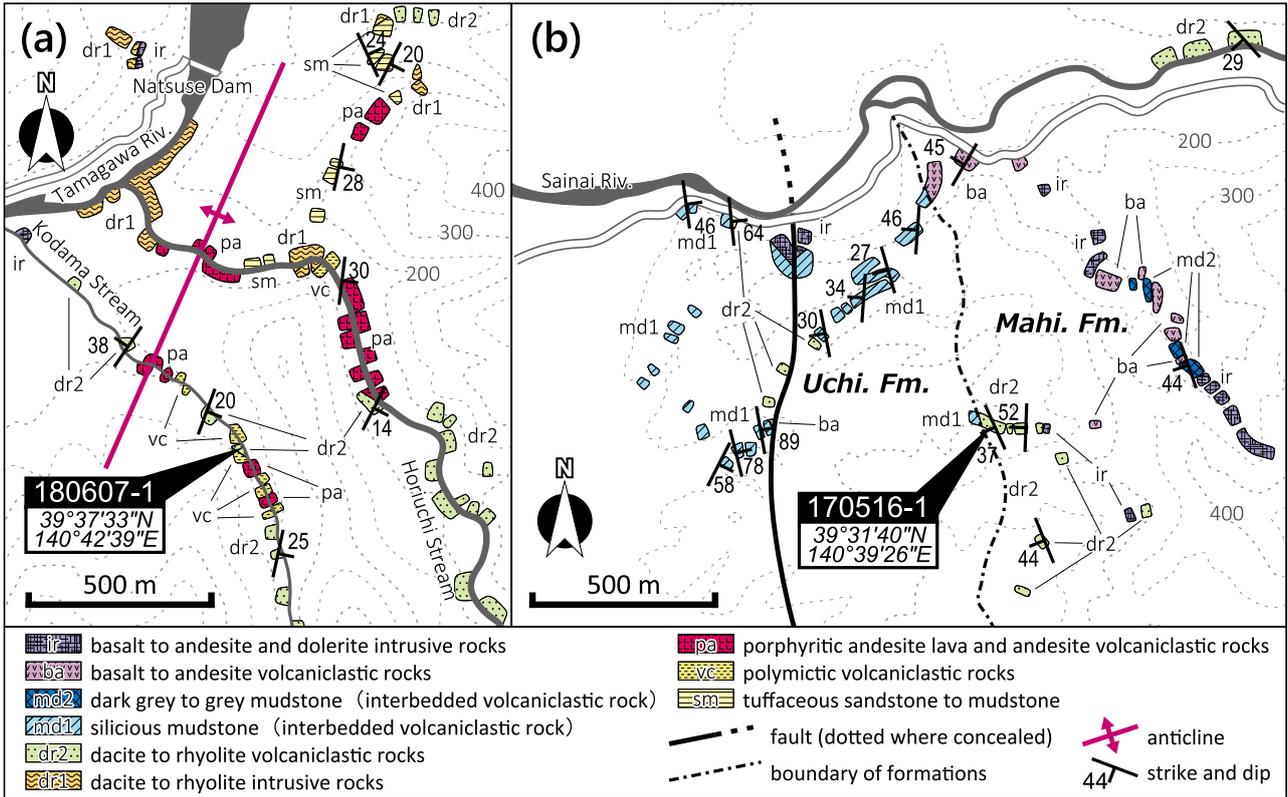
いずれの岩相も強い変質を被っている。そのため，安山岩溶岩の斑晶は苦鉄質鉱物，珪長質鉱物問わず，緑泥石やイライト，スメクタイト等の粘土鉱物に置換されている。緑れん石が認められるものもある。斑状安山岩溶岩及び同質火山碎屑岩 (pa) と多源礫火山碎屑岩 (vc) は共

に濃緑色を呈し強固に固結するため，岩相境界の識別が困難な箇所が多い。

年代測定試料(180607-1)は，多源礫火山碎屑岩 (vc) に挟まれる厚さ約2 mの珪長質細粒凝灰岩 (dr2) から採取した。採取地点では珪長質凝灰岩の直上に多源礫火山碎屑岩 (vc) が重なる。珪長質凝灰岩は薄灰色を呈し，塊状または一部に成層構造が発達し，生物擾乱が認められる (第4図A)。

2.2 齊内川南の奥羽脊梁山脈西縁(真昼川層上部)

この地域には，真昼川層と内沢川層が分布する。南北性の断層付近を境に地層の傾きが変わるものの，東側に分布する真昼川層を西側に分布する内沢川層が整合に被覆する。この地域の真昼川層は，デイサイト～流紋岩火



第3図 年代測定用試料採取地付近のルートマップ。破線は真昼川層と内沢川層の境界を示す。(a) 夏瀬ダム南, (b) 齊内川南の奥羽脊梁山脈西縁部。Mahi. Fm.: 真昼川層, Uchi. Fm.: 内沢川層。

Fig. 3 Route maps around the sampling sites for dating. Dotted line shows the boundary between the Mahirugawa and the Uchizawagawa formations. (a) Area of the south of Natsuse Dam, (b) Area of the western part of Ou Backbone Range to the south of Sainai River. Mahi. Fm.: Mahirugawa Formation, Uchi. Fm.: Uchizawagawa Formation.



第4図 (A) 試料180607-1を採取した露頭写真, (B) 試料170516-1の薄片写真。pl: 斜長石。

Fig. 4 (A) Photograph of the outcrop where the sample 180607-1 was collected, (B) microphotograph of the sample 170516-1 under cross polarized light. pl: plagioclase.

山碎屑岩(dr2)と玄武岩～安山岩火山碎屑岩(ba)，暗灰色～灰色泥岩(md2)の互層からなる。内沢川層は珪質泥岩(md1)を主体とし，一部にデイサイト～流紋岩火山碎屑岩(dr2)と玄武岩～安山岩火山碎屑岩(ba)を挟む。玄武岩～安山岩及びドレライト貫入岩(ir)はこれらを貫く。

年代測定試料(170516-1)として，内沢川層・真昼川層境界から約10～20 m下位の真昼川層の成層したデイサイト～流紋岩火山礫凝灰岩～凝灰岩を採取した。採取地点の珪長質火山碎屑岩は層厚数十m以上で，灰色～乳白色を呈する成層した火山礫凝灰岩～凝灰岩である。本試料は，主に珪長質鉱物や変質鉱物等からなり，まばらに径0.3 mm以下の斜長石結晶を含む(第4図B)。

3. U-Pb・FT年代測定

3.1 測定手順

同一ジルコン結晶を用いたU-Pb及びFTダブル年代測定を行った。抽出したジルコン結晶はランダムに選んだ約100粒を外部面が露出するようにPFA(フッ素樹脂)シートに埋め込んだ。測定試料はダイヤモンドペーストで研磨した後，KOH+NaOH共融液(225℃)を用いFTが等方的に分布するまでエッチングを行った。エッチングした粒子はランダムに30粒子選別し，光学顕微鏡(Nikon Eclipse E1000)+高解像度デジタルカメラ(Hamamatsu digital camera Model C9440-05G)+高品位タッチパネルモニター(Touch Panel Systems 17-inch LCD TouchMonitor)の測定システム(Danhara and Iwano, 2009)でジルコン中の自発FT密度を測定した。

FT年代用のウラン濃度測定とU-Pb年代測定はLA-ICP-MS(レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析)法により，FT密度測定を行った同一領域内で実施した。質量分析装置は四重極型ICP-MS(Thermo Fisher Scientific, iCAP-TQまたはiCAP-Qc)，レーザーサンプリング装置にはフェムト秒レーザー(Light Conversion, CARBIDEまたはCyber Laser Inc., IFRIT)を組み合わせた。測定装置の詳細及び試料毎の使用分析装置とその条件を第1表に示す。なお，今回用いたフェムト秒レーザーの場合，レーザースポット径が約10 μmの円形で固定しているため，広い計数面積での平均的なウラン濃度を求めるため，ガルバノ光学系による多数点同時分析(Yokoyama *et al.*, 2011)を用いた。U-Pb分析では²⁹Si, ²⁰²Hg, ²⁰⁴Pb, ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb, ²⁰⁸Pb, ²³²Th, ²³⁸Uをモニターし，²³⁸U-²⁰⁶Pb年代及び²³⁵U-²⁰⁷Pb年代を求めた。U-Pb年代測定の同位体分別の補正には1次スタンダードとしてNancy 91500ジルコン(Wiedenbeck *et al.*, 1995)を用い，²⁰⁶Pb/²³⁸U = 0.17917の値を用いた。さらに，年代測定結果の正確性を評価するために，2次スタンダードとしてOD-3ジルコン(33.0 Ma; 岩野ほか, 2012; Iwano *et al.*, 2013)とPlešoviceジルコン(337.1 Ma; Sláma *et al.*, 2008)も分析

した。年代誤差には試料の分析前後に測定した91500ジルコンの²⁰⁶Pb/²³⁸U及び²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb比の繰り返し再現性(%2SD)を外部誤差として伝播させた。各同位体信号に由来する計数統計誤差も年代誤差に伝播させた。

FT年代測定用のウラン濃度評価は，U-Pb年代用スタンダード91500(74あるいは100 ppm片)を基準とした。LA装置はU-Pb分析と同様である。年代較正の1次標準試料として28.4 MaのFish Canyon Tuff (Danhara and Iwano, 2013)を用い，さらに測定結果の正確性の評価のために，FT年代測定の2次標準試料として61 MaのTardree Rhyoliteまたは16 MaのBuluk Member Tuff (Danhara and Iwano, 2013)を用いた。

3.2 測定結果と年代値の評価

試料毎に年代測定結果を記す。本報告では²³⁸U-²⁰⁶Pb年代と²³⁷U-²⁰⁵Pb年代が2σの誤差内で一致する粒子をコンコダント，一致しない粒子をディスコダントとした。最若粒子集団の認定は幾つか手法があるが，MSWD(mean square weighted deviation)の値が1に近く，母集団の年代分布の再現性が高いと判断された，Dickinson and Gehrels (2009)のYC2σ(3+)法を用いて認定した。U-Pb年代は²³⁸U-²⁰⁶Pb年代を採用した。YC2σ(3+)法は，誤差を1σで表しているが，本論では年代値をより正確な値として示すために，FT及びU-Pb年代の誤差を2σで示した。コンコディア図は第5図，粒子ごとのU-Pb及びFT年代は第6図，詳細な年代測定データは第2表，付表1，付表2に示す。

3.2.1 試料180607-1(夏瀬ダム南)

本試料に含まれるジルコンは細粒だが，測定に十分な数の自形ジルコン結晶を得ることができた(原岩0.45 kg中に約160粒)。U-Pb年代測定では測定粒子30粒中，20粒子からコンコダントな年代を得た。コンコダントな20粒子のうち，11粒子が最若粒子集団とみなされた。それらの加重平均値は13.2 ± 0.6 Maである。

一方のFT年代測定では，比較的古いU-Pb年代値を示す粒子(no. 3)も含めた全測定粒子30粒の年代値がよくまとまる。従って，FT年代値はトータルリセットされた年代と解釈される。FT年代値の算出は，上記U-Pb年代値の計算で用いた最若粒子集団を用いた。それらの加重平均値は9.9 ± 1.7 Maである。

本試料のU-Pb年代値とFT年代値には，有意な差が認められる。この原因は以下の理由より，堆積後の変質作用によるものと考えた。FT年代の部分アニーリング領域(partial annealing zone)は，被熱温度と時間によるが，例えば，被熱時間100万年の場合で230～330℃である(Tagami and Shimada, 1996)。試料採取地付近は，緑れん石が形成されるような変質作用を被っている。変質作用で形成される緑れん石は，おおよそ200℃以上の環境下

Table 1 年代測定に用いたLA-ICP-MSと測定条件

Table 1 Instrumentation and operational conditions for the LA-ICP-MS analysis of this study.

| Sample name | 180607-1 | Sample name | 170516-1 |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Laser ablation | | Laser ablation | |
| Model | CARBIDE (Light Conversion) | Model | IFRIT (Cyber Laser Inc., Tokyo Japan) |
| Laser type (wave length) | Femtosecond laser | Laser type (wave length) | Type-C Ti:S femtosecond laser |
| Pulse duration | 224 fs | Pulse duration | 230 fs |
| Wave length | 260 nm | Wave length | 260 nm |
| Energy density | 3.7 J/cm ² | Energy density | 2.83 J/cm ² |
| Laser power | 50% | Laser power | 45% |
| Spot size | 10 μm | Spot size | 10 μm × 9 pits |
| The number of pits | 4 | The number of pits | 9 |
| Repetition rate | 10 Hz | Repetition rate | 20 Hz |
| Duration of laser ablation | 24 s | Duration of laser ablation | 20 s |
| Sampling mode | Multiple-spot per grain with Galvanometric optics | Sampling mode | Multiple-spot per grain with Galvanometric optics |
| Sampling area | 20 × 20 μm ² | Sampling area | 30 × 30 μm ² |
| Carrier gas (He) | 0.60 L min ⁻¹ | Carrier gas (He) | 0.83 L min ⁻¹ |
| ICP-MS | | ICP-MS | |
| Model | Thermo Fisher Scientific iCAP-TQ | Model | Thermo Fisher Scientific iCAP-Qc |
| ICP-MS type | Quadrupole | ICP-MS type | Quadrupole |
| Scanning (Operation) mode | Single Quadrupole mode (no collision gas was used) | Scanning (Operation) mode | Standard mode (no collision gas was used) |
| Forward power | 1550 W | Forward power | 1400 W |
| Make-up gas (Ar) | 0.95 L min ⁻¹ | Make-up gas (Ar) | 1.10 L min ⁻¹ |
| ThO ⁺ /Th (oxide ratio) | <1% | ThO ⁺ /Th (oxide ratio) | <1% |
| Data acquisition protocol | Time-resolved analysis | Data acquisition protocol | Time-resolved analysis |
| Data acquisition | 50 s (15 s gas blank, 35 s ablation) | Data acquisition | 50 s (15 s gas blank, 35 s ablation) |
| Monitor isotopes | ²⁹ Si, ²⁰² Hg, ²⁰⁴ Pb, ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb, ²⁰⁸ Pb, ²³² Th, ²³⁸ U | Monitor isotopes | ²⁹ Si, ²⁰² Hg, ²⁰⁴ Pb, ²⁰⁶ Pb, ²⁰⁷ Pb, ²⁰⁸ Pb, ²³² Th, ²³⁸ U |
| Dwell time | 0.2 s for ^{206,207} Pb, 0.1 s for others | Dwell time | 0.2 s for ^{206,207} Pb, 0.1 s for others |
| Standards | | Standards | |
| Primary standard (U-Pb) | Nancy 91500 ^{*1} | Primary standard (U-Pb) | Nancy 91500 ^{*1} |
| Secondary standard (U-Pb) | OD-3 ^{*2,3,4} , Plešovice ^{*5} | Secondary standard (U-Pb) | OD-3 ^{*2,3,4} , Plešovice ^{*5} |
| Primary standards (FT) | Fish Canyon Tuff ^{*6} | Primary standards (FT) | Fish Canyon Tuff ^{*6} |
| Secondary standard (FT) | Tardree Rhyolite ^{*6} | Secondary standard (FT) | Buluk Member Tuff ^{*6} |

*1, Wiedenbeck *et al.* (1995); *2, Iwano *et al.* (2012); *3, Iwano *et al.* (2013); *4, Lukács *et al.* (2015); *5, Sláma *et al.* (2008); *6, Danhara and Iwano (2013)

で生成される (White and Hedenquist, 1995; 吉村, 2001). 本試料は少なからず変質作用によってFTがアニーリングされ、若返った年代を示す可能性が考えられる。

試料採取地から北方約4 kmの地点では、真昼川層中に鉱床が胚胎する(霜岱鉱山)。その鉱床からは10.9 ± 1.4 MaのセリサイトK-Ar年代が得られている(通商産業省資源エネルギー庁, 1986)。この値と本測定で得たFT年代値は誤差範囲で一致する。本試料は、熱水変質作用を11 ~ 10 Ma頃に被ったか、堆積後からその頃まで継続して被っていた可能性が示唆される。

以上より、本試料の年代としては結晶生成年代を示すU-Pb年代値を採用し、13.2 ± 0.6 Maとする。

3. 2. 2 試料170516-1 (齊内川南の奥羽脊梁山脈西縁)

本試料は豊富な自形ジルコン結晶を含む(原岩0.3 kg中に約3,000粒)。U-Pb年代測定では、測定粒子30粒中28粒子からコンコダントな年代値を得た。それらのうち

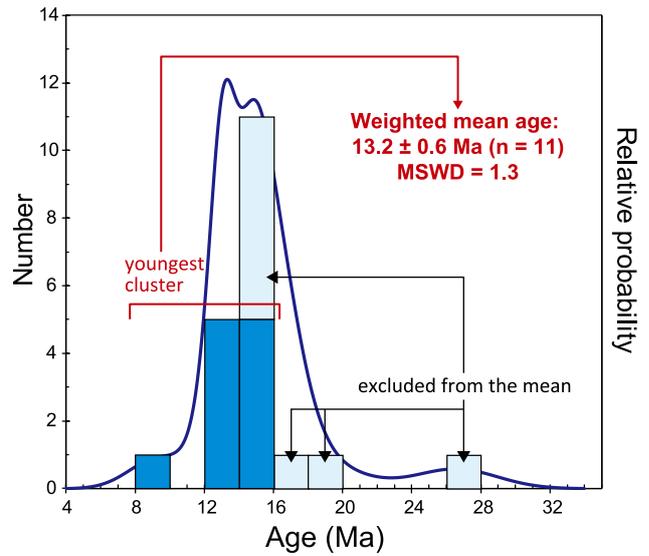
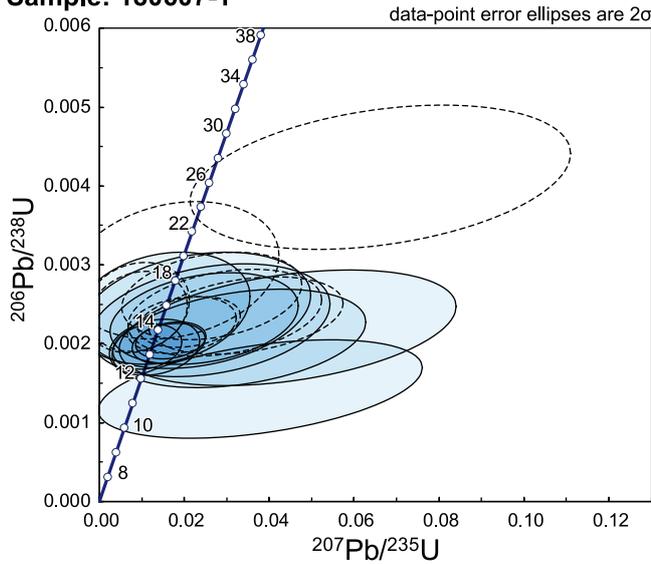
の26粒子が最若粒子集団とみなされ、その加重平均値は13.7 ± 0.3 Maである。一方のFT年代測定では、全測定粒子30粒の年代値はよくまとまる。本論では上記U-Pb年代値の計算で用いた最若粒子集団の年代値を用い、それらの加重平均値から12.6 ± 1.4 MaのFT年代値を得た。

U-Pb年代値とFT年代値は誤差範囲で差があるとは言えない。本論では本質的な年代値が得られたU-Pb年代値を採用し、本試料の年代を13.7 ± 0.3 Maとする。

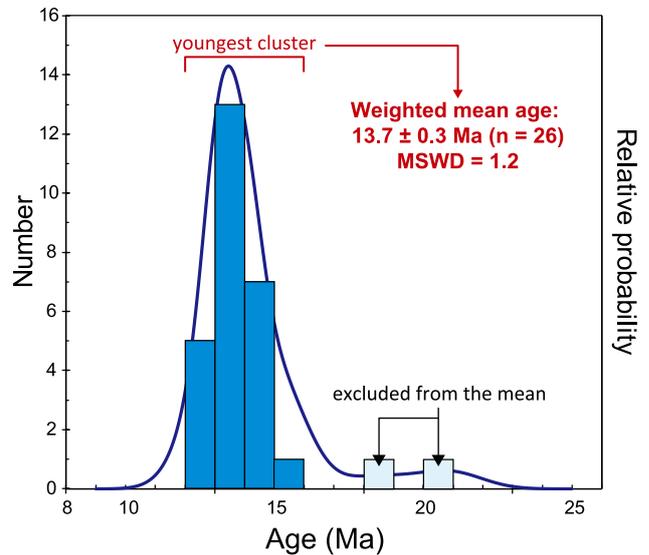
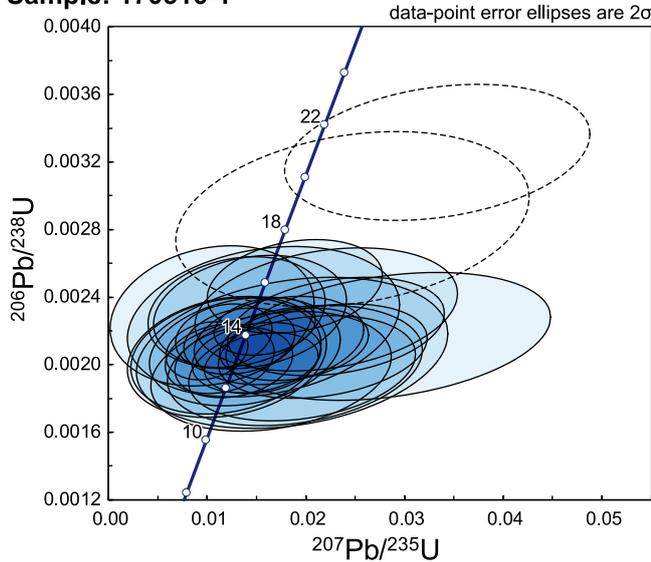
4. 真昼川層の年代と対比

従来の広域的な岩相対比では、真昼川層は西黒沢層相当層に、内沢川層は女川層に対比されていた(白田ほか, 1980)。これは、真昼川層が火山岩主体であるのに対し、内沢川層が珪質泥岩主体であることによる(白田ほか, 1980)。しかし、真昼川層は一部に内沢川層の岩相と同様の珪質泥岩を挟む。一方、内沢川層は珪質泥岩

Sample: 180607-1



Sample: 170516-1



第5図 ジルコンU-Pbコンコーディア図と年代ヒストグラム，確率分布曲線。コンコーディア図上の破線で示したデータは年代値の計算から除外した。上段と下段はそれぞれ試料180607-1と170516-1。

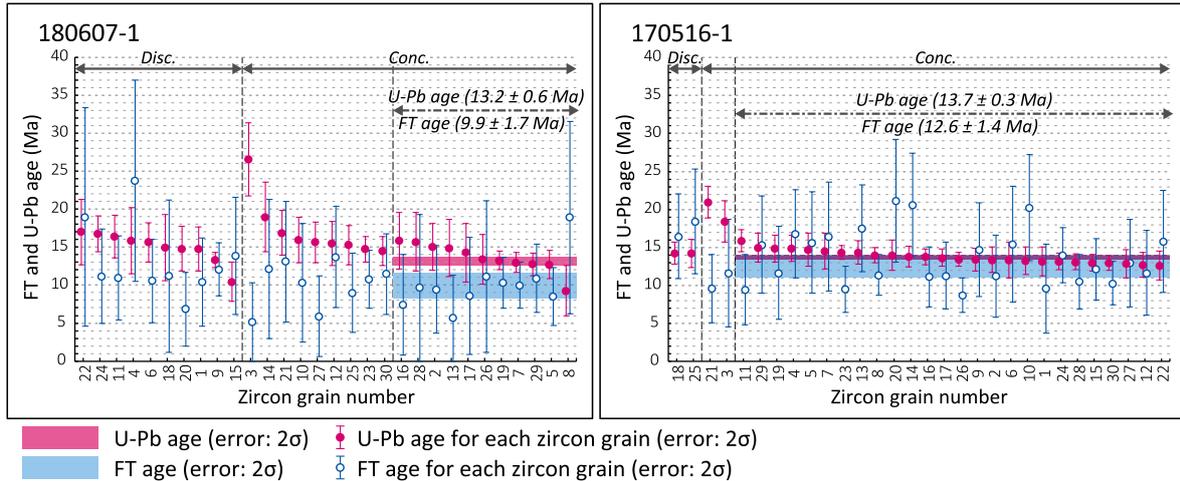
Fig. 5 Zircon U-Pb concordia diagram and age data histogram with probability curve for each sample. The age data shown by dotted ellipses in concordia diagram were excluded to determine the ages of the samples. The upper and lower side are sample 180607-1 and 170516-1, respectively.

を主体とするものの，真昼川層の岩相と同様な火山碎屑岩を挟む。調査地西方の女川層は，僅かに火山碎屑岩を挟むものの，硬質泥岩，暗灰色泥岩を主体とした地層で（土谷・吉川，1994），本地域の内沢川層とは岩相が異なる。これらの岩相の比較に基づけば，内沢川層は女川層相当ではなく，西黒沢層相当である可能性が考えられる。

本地域に分布する真昼川層の下部と上部の試料から，それぞれ 13.2 ± 0.6 Ma と 13.7 ± 0.3 Ma のU-Pb年代値を得た。下部と上部の年代値は，誤差を考慮するとほぼ同

じである。したがって，真昼川層上限の年代，つまり真昼川層とそれを整合に覆う内沢川層の境界年代は，14～13 Ma頃と考えられる。

西黒沢層または西黒沢層相当層と女川層の境界年代は，約12 Maとされている（鹿野ほか，2011；鹿野，2018）。以下では，男鹿半島及び本地域の周辺地域における西黒沢層・女川相当層の境界年代について概観する。なお，微化石の年代値はAnthonissen and Ogg (2012) と Yanagisawa and Akiba (1998) 及び鹿野ほか(2011)による。



第6図 全ジルコン粒子毎のU-Pb・FT年代(誤差2σ)。赤と青で示した区画は、横が加重平均値で用いたジルコン粒子、縦が加重平均値の誤差2σの範囲を示す。縦方向の破線はU-Pb年代のグループ分けを示す。Conc.: コンコードラント粒子, Disc.: ディスココードラント粒子。

Fig. 6 Diagram showing the U-Pb and FT ages with 2σ error bars of individual zircon grains. The blue and red zone show the range of zircon grains for weighted mean calculation, and the height of them show 2σ error bars of the weighted mean of U-Pb and FT ages for each sample. Vertical dashed lines indicate boundaries between groups of U-Pb ages. Conc.: zircons with concordant U-Pb age, Disc.: zircons with discordant U-Pb age.

Table 2 FT及びU-Pb年代測定の結果

Table 2 Results of fission-track and U-Pb dating of the two samples from the study area (Fig. 2).

| Sample name | Stratigraphic unit | Locality | | Surface | n | FT ages ±2σ (Ma) | U-Pb ages ±2σ (Ma) |
|-------------|--------------------|------------|-------------|---------|----|------------------|--------------------|
| | | Longitude | Latitude | | | | |
| 180607-1 | Mahirugawa Fm. | 39°37'33"N | 140°42'39"E | Int.S | 11 | 9.9 ± 1.7 | 13.2 ± 0.6 |
| 180607-1 | Mahirugawa Fm. | 39°37'33"N | 140°42'39"E | Int.S | 30 | 10.6 ± 1.2* | |
| 170516-1 | Mahirugawa Fm. | 39°31'40"N | 140°39'26"E | Int.S | 26 | 12.6 ± 1.4 | 13.7 ± 0.3 |
| 170516-1 | Mahirugawa Fm. | 39°31'40"N | 140°39'26"E | Int.S | 30 | 12.7 ± 1.4* | |

| Sample name | Fission Track Data | | LA-ICPMS Data | | | | Zeta value | r | Uranium content (ppm) |
|-------------|-----------------------------------------------------|----------------|---------------------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------|--------------------|------------|-------|-----------------------|
| | ρ _s (×10 ⁶ cm ⁻²) | N _s | Sample | | U-standard | | | | |
| | | | ρ _{U-sp} (×10 ¹⁰ cm ⁻²) | N _{U-sp} | ρ _{U-std} (×10 ⁹ cm ⁻²) | N _{U-std} | | | |
| 180607-1 | 1.98 | 172 | 3.20 | 2646646 | 5.575 | 17504 | 54.6 ± 1.6 | 0.985 | 425 |
| 180607-1 | 1.87 | 439 | 2.96 | 6271117 | 5.575 | 17504 | 54.6 ± 1.6 | 0.986 | 393 |
| 170516-1 | 2.35 | 871 | 2.11 | 7585761 | 4.717 | 42453 | 46.4 ± 2.1 | 0.921 | 331 |
| 170516-1 | 2.23 | 969 | 1.98 | 8336535 | 4.717 | 42453 | 46.4 ± 2.1 | 0.918 | 311 |

$$FT \text{ age } (T) = (1/\lambda_D) \cdot \ln[1 + \lambda_D \cdot 0.5 \cdot \zeta \cdot (N_s/N_{U-sp}) \cdot \rho_{U-std}], \sigma_T = T \times [1/N_s + 1/N_{U-sp} + 1/N_{U-std} + (\sigma_\zeta/\zeta)^2]^{1/2}$$

Int.S: Internal zircon crystal surfaces used for spontaneous track counting, n: Number of counted zircon grains for FT dating, ρ_s: Spontaneous fission track density, N_s: Number of spontaneous fission tracks, ρ_{U-sp}: Density of area-corrected total count of ²³⁸U on unknown sample, N_{U-sp}: Area-corrected total count of ²³⁸U on unknown sample, ρ_{U-std}: Density of total count of ²³⁸U on U-standard sample, N_{U-std}: Total count of ²³⁸U on U-standard sample, r: correlation coefficient between ρ_s and ρ_U, *: reference age, λ_D: alpha decay constant for ²³⁸U (1.55125×10⁻¹⁰ yr⁻¹: Steiger and Jäger, 1977), ζ: zeta values for fission track age calibration.

男鹿半島に分布する西黒沢層からはN9帯とCN3及びCN4帯にそれぞれ対比される有孔虫化石、石灰質ナンノ化石が得られ(Saito and Maiya, 1973; 佐藤, 1982; 山科ほか, 2010), 女川層からNPD5A ~ 7Aの珪藻化石が得られている(Kanaya, 1959; Koizumi, 1968; 小泉・金谷, 1977; 小泉・的場, 1989; Koizumi *et al.*, 2009; 鹿野

ほか, 2011)。さらに、西黒沢層上限の海緑石砂岩の上限がNPD5B帯の上・下部境界の“Planktonic Foram. Sharp Surface”(米谷・井上, 1981)に対応することから、鹿野(2018)は男鹿半島の西黒沢層・女川層境界の年代を約12.3 Maとした。

調査地北西の阿仁合^{あにあい}周辺では、西黒沢層に対比される

北ノ又沢層からNN4～5帯にのみ産出する石灰質ナノ化石が得られ（通商産業省資源エネルギー庁，1998），阿仁合地域の女川層からはNPD5B～5Cの珪藻化石が得られている（Kanaya, 1959；的場，1992）。このことから，両地層境界の年代は約12 Maである（鹿野ほか，2012）。

調査地西方の刈和野地域では，西黒沢層に対比される八割層からN8～11帯の有孔虫化石とNN4～6帯の石灰質ナノ化石が得られ，かつ八割層上部のデイサイトからは12 Ma頃の全岩K-Ar年代値が得られている（通商産業省資源エネルギー庁，1986）。八割層を整合に覆う女川層からはNPD5C帯の珪藻化石が得られている（土谷・吉川，1994）。これらより，八割層と女川層境界の年代は約12 Maである（細井ほか，2019）。

以上のように，西黒沢層及び西黒沢層相当層と女川層境界の年代は，広範囲でほぼ同じと考えられ，約12 Maである。この年代は，本地域の真昼川層と内沢川層境界の年代とは一致しない。真昼川層と内沢川層の岩相及び年代から判断すると，内沢川層は女川層に対比されるのではなく，真昼川層と同様に西黒沢層に対比されるのが妥当である。

5. まとめ

- ・調査地域に分布する真昼川層の下部と上部を対象に，FT及びU-Pbダブル年代測定を行った。
- ・火山碎屑岩中のジルコンU-Pb年代に基づく，真昼川層の下部と上部の年代はほぼ同じで，真昼川層と内沢川層の境界年代は14～13 Ma頃である。
- ・真昼川層と内沢川層は岩相と年代から判断すると，秋田地域標準層序の西黒沢層に対比するのが妥当である。

謝辞：本研究を遂行するにあたって，産総研地質情報基盤センター地質試料調製グループの方々には，薄片を作成して頂いた。査読者の野田 篤博士及び編集担当の内野隆之博士（共に地質情報研究部門）からは，原稿改善にあたって有益なご意見を頂いた。記して深く感謝申し上げます。

文 献

秋田県（1989）土地分類基本調査「角館・鶯宿」。秋田県，58p.

天野一男・佐藤比呂志（1989）東北本州弧中部地域の新生代テクトニクス。地質学論集，no. 32，81–96.

Anthonissen, D. E. and Ogg, J. G. (2012) Cenozoic and Cretaceous biochronology of planktonic foraminifera and calcareous nannofossils. In Grandstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D. and Ogg, G. M., eds., *The Geologic Time Scale 2012*, Elsevier, Amsterdam, 1083–1127.

Danhara, T. and Iwano, H. (2009) Determination of zeta values

for fission-track age calibration using thermal neutron irradiation at the JRR-3 reactor of JAEA, Japan. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **115**, 141–145.

Danhara, T. and Iwano, H. (2013) A review of the present state of the absolute calibration for zircon fission track geochronometry using the external detector method. *Island Arc*, **22**, 264–279.

Dickinson, W. R. and Gehrels, G. E. (2009) Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: A test against a Colorado Plateau Mesozoic database. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **288**, 115–125.

星 博幸・岩野英樹・檀原 徹（2016）東北日本，津軽半島に分布する磯松層の年代：中新世グリーンタフのジルコンU-Pb年代測定。地質雑，**122**，163–170.

細井 淳・中嶋 健・檀原 徹・岩野英樹・平田岳史・天野一男（2018）岩手県西和賀町に分布するグリーンタフのジルコンFTおよびU-Pb年代とその意味。地質雑，**124**，819–835.

細井 淳・工藤 崇・羽地俊樹・岩野英樹・檀原 徹・平田岳史（2019）出羽山地東縁，秋田県角館町周辺の上層漸新統および中新統の層序。地質雑，**125**，279–295.

池辺 穰（1962）秋田油田地域における含油第三系の構造発達と石油の集積について。秋田大学鉱山学部地下資源開発研究所報告，no. 26，1–59.

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ュン・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., Hirata, T., Ogasawara, M., Danhara, T., Horie, K., Hasebe, N., Sueoka, S., Tamura, A., Hayasaka, Y., Katsube, A., Ito, H., Tani, K., Kimura, J., Chang, Q., Kouchi, Y., Haruta, Y. and Yamamoto, K. (2013) An inter-laboratory evaluation of OD-3 zircon for use as secondary U-Pb dating standard. *Island Arc*, **22**, 382–394.

Kanaya, T. (1959) Miocene diatom assemblages from the Onnagawa Formation and their distribution in the correlative formations in northeast Japan. *Science Reports of the Tohoku University, Series 2*, **30**, 1–130.

鹿野和彦（2018）グリーンタフの層序学的枠組みと地質学的事象。地質雑，**124**，781–803.

鹿野和彦・大口健志・柳沢幸夫・栗田泰夫・小林紀彦・佐藤雄太・林信太郎・北里 洋・小笠原憲四郎・駒澤正夫（2011）戸賀及び船川地域の地質（第2版）。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，127p.

鹿野和彦・大口健志・石川洋平・矢内桂三・藤本幸雄・植村和彦・小笠原憲四郎・駒澤正夫（2012）阿仁合

- 地域の地質(第2版). 地域地質研究報告書(5万分の1地質図幅), 産総研地質調査総合センター, 59p.
- Koizumi, I. (1968) Tertiary diatom flora of Oga Peninsula, Akita Prefecture. Northeast Japan. Science Reports of the Tohoku University, *Series 2*, **40**, 171–240.
- 小泉 格・金谷太郎 (1977) 男鹿半島と秋田市北方丘陵における新第三系の対比. 藤岡一男教授退官記念論文集, 401–412.
- 小泉 格・的場保望 (1989) 西黒沢層の上限について. 地質学論集, no. 32, 187–195.
- Koizumi, I., Sato, M. and Matoba, Y. (2009) Age and significance of Miocene diatoms and diatomaceous sediments from northeast Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **272**, 85–98.
- Lukács, R., Harangi, S., Bachmann, O., Guillong, M., Danišik, M., Buret, Y., von Quadt, A., Dunkl, I., Fodor, L., Sliwinski, J., Soós, I. and Szepesi, J. (2015) Zircon geochronology and geochemistry to constrain the youngest eruption events and magma evolution of the Mid-Miocene ignimbrite flare-up in the Pannonian Basin, eastern-central Europe. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **170**, 52. doi: 10.1007/s00410-015-1206-8.
- 米谷盛壽郎・井上洋子 (1981) 新潟堆積盆地における中新統下部の有孔虫化石群集と古地理の変遷. 化石, no. 30, 73–78.
- 的場保望 (1992) 秋田油田新第三系・第四系層序に関する最近の変革. 石油技術協会誌, **57**, 315–333.
- 佐賀 肇 (1992) B-2 秋田・山形地域, 第II編 日本海側グリーンタフ地域の石油地域. 改訂版「日本の石油・天然ガス資源」編集委員会編, [改訂版] 日本の石油・天然ガス資源, 天然ガス鉱業会・大陸石油開発協会, 53–80.
- Saito, T. and Maiya, S. (1973) Planktonic foraminifera of the Nishikurosawa Formation, northeast Honshu, Japan. *Transactions and Proceedings of Palaeontological Society of Japan, New Series*, no. 91, 113–125.
- Sato, H. and Amano, K. (1991) Relationship between tectonics, volcanism, sedimentation and basin development, Late Cenozoic, central part of Northern Honshu, Japan. *Tectonophysics*, **355**, 41–52.
- 佐藤時幸 (1982) 石灰質微化石群集に基づく七谷層と西黒沢層の生層序学的考察. 石油技術協会誌, **47**, 374–379.
- Steiger, R. H. and Jäger, E. (1977) Subcommission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **36**, 359–362.
- Sláma, J., Košler, J., Condon, J. D., Crowley, J. L., Gerdes, A., Hanzhar, J. M., Horstwood, M. S. A., Morris, G. A., Nasdala, L., Norberg, N., Schaltegger, U., Schoene, B., Tubrett, M. N. and Whitehouse, M. J. (2008) Plešovice zircon—A new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chem. Geol.*, **249**, 1–35.
- Tagami, T. and Shimada, C. (1996) Natural long-term annealing of the zircon fission track system around a granitic pluton. *J. Geophys. Res.*, **101**, 8245–8255.
- 土谷信之・吉川敏之 (1994) 刈和野地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅), 地質調査所, 72p.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (1986) 昭和60年度広域調査報告書「田沢地域」. 151p.
- 通商産業省資源エネルギー庁 (1998) 黒鉱型鉱床の地球化学的特性を利用した潜頭鉱床探鉱—秋田県五城目町馬場黒鉱鉱床地域の地質—上小阿仁村萩形地域の火山層序と黒鉱鉱化作用に伴う熱水変質作用. 平成9年度鉱物資源探査技術開発調査報告書(Ⅱ), 各論Ⅲ, 1–103.
- 臼田雅郎・村山 進・白石建雄・高安泰助・乗富一雄 (1980) 秋田県総合地質図幅「角館」, 秋田県, 86p.
- 脇田浩二・井川敏恵・宝田晋治編 (2009) 20万分の1日本シームレス地質図DVD版, 数値地質図G-16. 産業技術総合研究所地質調査総合センター.
- White, N. C. and Hedenquist, J. W. (1995) Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *SEG Newsletter*, no. 23, 1–9.
- Wiedenbeck, M., Allé, P., Corfu, F., Griffin, W. L., Meier, M., Oberli, F., von Quadt, A., Roddick, J. C. and Spiegel, W. (1995) Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostand. Geoanal. Res.*, **19**, 1–23.
- 山科起行・山崎 誠・佐藤時幸 (2010) 秋田県男鹿半島南岸西黒沢層の岩相層序と地質時代. 石油技術協会春季講演会特別講演・シンポジウム・個人講演要旨集, 54.
- Yanagisawa, Y. and Akiba, F. (1998) Refined Neogene diatom biostratigraphy for the northwest Pacific around Japan, with and introduction of code numbers for selected diatom biohorizons. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **114**, 395–414.
- Yokoyama, D. T., Suzuki, T., Kon, Y. and Hirata, T. (2011) Determination of rare earth element abundance and U-Pb ages of zircons using multisport laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analy. Chem.*, **83**, 8892–8899.
- 吉村尚久 (2001) 粘土鉱物と変質作用. 地学双書, 29, 地学団体研究会, 293p.

(受付: 2019年1月29日; 受理: 2019年5月8日)
(早期公開: 2019年7月19日)

付録

Appendices

付表A1 全ジルコン粒子のU-Pb分析データ

Table A1 U-Pb analytical data of zircon grains

| sample name grain No. | Th U | Isotopic ratios | | | | Age (Ma) | | | | Remarks | |
|-----------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|--------------------|----------------|--------------------|
| | | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ | Error 2σ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | Error 2σ | $\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$ | Error 2σ | $\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ | Error 2σ | | |
| 180607-1 | | | | | | | | | | | |
| No.1 | 0.81 | 0.1446 ± 0.0809 | | 0.0023 ± 0.0005 | | 0.0455 ± 0.0244 | | 14.77 ± 2.90 | | 45.04 ± 24.02 | Discordant |
| No.2 | 1.03 | 0.0771 ± 0.0580 | | 0.0023 ± 0.0005 | | 0.0247 ± 0.0182 | | 15.04 ± 3.05 | | 24.66 ± 18.15 | |
| No.3 | 0.37 | 0.1167 ± 0.0656 | | 0.0041 ± 0.0007 | | 0.0662 ± 0.0366 | | 26.56 ± 4.80 | | 64.99 ± 35.50 | Excluded from mean |
| No.4 | 0.52 | 0.2452 ± 0.1532 | | 0.0025 ± 0.0007 | | 0.0829 ± 0.0488 | | 15.87 ± 4.35 | | 80.79 ± 46.83 | Discordant |
| No.5 | 0.64 | 0.0481 ± 0.0326 | | 0.0020 ± 0.0003 | | 0.0130 ± 0.0086 | | 12.69 ± 1.86 | | 12.99 ± 8.69 | |
| No.6 | 0.79 | 0.2595 ± 0.1006 | | 0.0024 ± 0.0004 | | 0.0863 ± 0.0315 | | 15.62 ± 2.59 | | 83.97 ± 29.87 | Discordant |
| No.7 | 0.92 | 0.0589 ± 0.0260 | | 0.0020 ± 0.0002 | | 0.0163 ± 0.0070 | | 12.98 ± 1.34 | | 16.28 ± 7.04 | |
| No.8 | 0.39 | 0.1929 ± 0.1697 | | 0.0014 ± 0.0005 | | 0.0379 ± 0.0312 | | 9.26 ± 3.27 | | 37.65 ± 30.99 | |
| No.9 | 1.38 | 0.0956 ± 0.0261 | | 0.0021 ± 0.0002 | | 0.0271 ± 0.0072 | | 13.31 ± 0.98 | | 27.04 ± 7.10 | Discordant |
| No.10 | 0.78 | 0.0258 ± 0.0301 | | 0.0025 ± 0.0005 | | 0.0088 ± 0.0101 | | 15.92 ± 3.02 | | 8.74 ± 10.15 | Excluded from mean |
| No.11 | 0.91 | 0.1243 ± 0.0648 | | 0.0025 ± 0.0004 | | 0.0434 ± 0.0219 | | 16.37 ± 2.80 | | 43.00 ± 21.50 | Discordant |
| No.12 | 0.83 | 0.0894 ± 0.0579 | | 0.0024 ± 0.0004 | | 0.0295 ± 0.0186 | | 15.50 ± 2.88 | | 29.41 ± 18.55 | Excluded from mean |
| No.13 | 0.46 | 0.0823 ± 0.0744 | | 0.0023 ± 0.0006 | | 0.0261 ± 0.0230 | | 14.89 ± 3.75 | | 26.05 ± 23.02 | |
| No.14 | 0.49 | 0.0434 ± 0.0506 | | 0.0029 ± 0.0007 | | 0.0176 ± 0.0202 | | 18.95 ± 4.59 | | 17.56 ± 19.98 | Excluded from mean |
| No.15 | 0.55 | 0.1713 ± 0.1127 | | 0.0016 ± 0.0004 | | 0.0379 ± 0.0236 | | 10.42 ± 2.60 | | 37.66 ± 23.33 | Discordant |
| No.16 | 0.47 | 0.0444 ± 0.0503 | | 0.0024 ± 0.0006 | | 0.0150 ± 0.0168 | | 15.86 ± 3.73 | | 15.00 ± 16.65 | |
| No.17 | 0.51 | 0.1459 ± 0.1112 | | 0.0022 ± 0.0006 | | 0.0443 ± 0.0324 | | 14.26 ± 3.84 | | 43.91 ± 32.03 | |
| No.18 | 0.36 | 0.2009 ± 0.1460 | | 0.0023 ± 0.0007 | | 0.0638 ± 0.0441 | | 14.92 ± 4.37 | | 62.72 ± 42.96 | Discordant |
| No.19 | 0.99 | 0.0595 ± 0.0244 | | 0.0020 ± 0.0002 | | 0.0168 ± 0.0067 | | 13.24 ± 1.23 | | 16.78 ± 6.76 | |
| No.20 | 0.80 | 0.1358 ± 0.0799 | | 0.0023 ± 0.0005 | | 0.0428 ± 0.0243 | | 14.79 ± 2.94 | | 42.40 ± 23.91 | Discordant |
| No.21 | 0.83 | 0.0735 ± 0.0490 | | 0.0026 ± 0.0005 | | 0.0265 ± 0.0173 | | 16.88 ± 2.91 | | 26.40 ± 17.26 | Excluded from mean |
| No.22 | 0.37 | 0.6052 ± 0.2690 | | 0.0026 ± 0.0007 | | 0.2191 ± 0.0882 | | 16.98 ± 4.35 | | 201.01 ± 76.30 | Discordant |
| No.23 | 0.67 | 0.0675 ± 0.0318 | | 0.0023 ± 0.0003 | | 0.0212 ± 0.0098 | | 14.73 ± 1.69 | | 21.15 ± 9.78 | Excluded from mean |
| No.24 | 0.60 | 0.1351 ± 0.0587 | | 0.0026 ± 0.0004 | | 0.0482 ± 0.0203 | | 16.74 ± 2.38 | | 47.69 ± 19.86 | Discordant |
| No.25 | 0.89 | 0.1063 ± 0.0593 | | 0.0024 ± 0.0004 | | 0.0345 ± 0.0187 | | 15.26 ± 2.57 | | 34.36 ± 18.55 | Excluded from mean |
| No.26 | 0.42 | 0.1156 ± 0.0886 | | 0.0021 ± 0.0005 | | 0.0330 ± 0.0244 | | 13.40 ± 3.28 | | 32.81 ± 24.30 | |
| No.27 | 0.83 | 0.0276 ± 0.0284 | | 0.0024 ± 0.0004 | | 0.0092 ± 0.0094 | | 15.62 ± 2.66 | | 9.19 ± 9.39 | Excluded from mean |
| No.28 | 0.46 | 0.0688 ± 0.0669 | | 0.0024 ± 0.0006 | | 0.0230 ± 0.0219 | | 15.69 ± 3.88 | | 22.97 ± 22.02 | |
| No.29 | 0.98 | 0.0418 ± 0.0250 | | 0.0020 ± 0.0002 | | 0.0113 ± 0.0067 | | 12.74 ± 1.51 | | 11.32 ± 6.72 | |
| No.30 | 0.74 | 0.0630 ± 0.0345 | | 0.0022 ± 0.0003 | | 0.0195 ± 0.0105 | | 14.51 ± 1.90 | | 19.47 ± 10.48 | Excluded from mean |
| <i>Weighted mean of the youngest group (n = 11)</i> | | | | | | | | 13.2 ± 0.6 | | 16.1 ± 3.3 | |
| Standards (PSV: Plešovice, OD3: OD-3) | | | | | | | | | | | |
| PSV 6-1 | 0.09 | 0.0535 ± 0.0097 | | 0.0538 ± 0.00200 | | 0.3976 ± 0.0739 | | 338.04 ± 12.26 | | 339.81 ± 55.17 | |
| PSV 6-2 | 0.09 | 0.0521 ± 0.0097 | | 0.0524 ± 0.00160 | | 0.3762 ± 0.0724 | | 329.17 ± 9.81 | | 324.15 ± 54.88 | |
| OD3 6-1 | 0.97 | 0.0588 ± 0.0229 | | 0.0049 ± 0.00044 | | 0.0394 ± 0.0152 | | 31.29 ± 2.85 | | 39.09 ± 14.94 | |
| OD3 6-2 | 1.11 | 0.0523 ± 0.0141 | | 0.0051 ± 0.00027 | | 0.0370 ± 0.0099 | | 33.05 ± 1.76 | | 36.76 ± 9.73 | |
| 170516-1 | | | | | | | | | | | |
| No.1 | 0.36 | 0.0425 ± 0.0296 | | 0.0020 ± 0.00029 | | 0.0120 ± 0.0083 | | 13.17 ± 1.88 | | 12.10 ± 8.35 | |
| No.2 | 0.47 | 0.0482 ± 0.0279 | | 0.0021 ± 0.00026 | | 0.0138 ± 0.0079 | | 13.38 ± 1.70 | | 13.92 ± 7.99 | |
| No.3 | 0.41 | 0.0626 ± 0.0375 | | 0.0029 ± 0.00042 | | 0.0247 ± 0.0146 | | 18.42 ± 2.72 | | 24.80 ± 14.76 | Excluded from mean |
| No.4 | 0.46 | 0.0407 ± 0.0231 | | 0.0023 ± 0.00027 | | 0.0130 ± 0.0073 | | 14.88 ± 1.72 | | 13.08 ± 7.40 | |
| No.5 | 0.38 | 0.0332 ± 0.0269 | | 0.0023 ± 0.00034 | | 0.0105 ± 0.0084 | | 14.74 ± 2.18 | | 10.60 ± 8.53 | |
| No.6 | 0.32 | 0.0652 ± 0.0459 | | 0.0021 ± 0.00036 | | 0.0186 ± 0.0129 | | 13.33 ± 2.35 | | 18.72 ± 13.00 | |
| No.7 | 0.32 | 0.0505 ± 0.0367 | | 0.0023 ± 0.00036 | | 0.0157 ± 0.0113 | | 14.52 ± 2.35 | | 15.81 ± 11.39 | |
| No.8 | 0.82 | 0.0390 ± 0.0134 | | 0.0022 ± 0.00016 | | 0.0117 ± 0.0040 | | 13.97 ± 1.00 | | 11.79 ± 4.06 | |
| No.9 | 0.50 | 0.0757 ± 0.0305 | | 0.0021 ± 0.00023 | | 0.0217 ± 0.0086 | | 13.40 ± 1.47 | | 21.81 ± 8.72 | |
| No.10 | 0.32 | 0.0420 ± 0.0282 | | 0.0021 ± 0.00028 | | 0.0119 ± 0.0079 | | 13.21 ± 1.81 | | 12.00 ± 7.98 | |
| No.11 | 0.48 | 0.0556 ± 0.0214 | | 0.0025 ± 0.00023 | | 0.0189 ± 0.0072 | | 15.86 ± 1.46 | | 18.99 ± 7.31 | |
| No.12 | 0.50 | 0.0718 ± 0.0349 | | 0.0020 ± 0.00025 | | 0.0196 ± 0.0094 | | 12.75 ± 1.64 | | 19.70 ± 9.48 | |
| No.13 | 0.59 | 0.0752 ± 0.0296 | | 0.0022 ± 0.00024 | | 0.0231 ± 0.0090 | | 14.32 ± 1.53 | | 23.16 ± 9.06 | |
| No.14 | 0.33 | 0.0585 ± 0.0240 | | 0.0021 ± 0.00021 | | 0.0173 ± 0.0070 | | 13.81 ± 1.38 | | 17.42 ± 7.11 | |
| No.15 | 0.75 | 0.0457 ± 0.0177 | | 0.0020 ± 0.00017 | | 0.0127 ± 0.0049 | | 12.97 ± 1.11 | | 12.80 ± 4.96 | |
| No.16 | 0.62 | 0.0450 ± 0.0155 | | 0.0021 ± 0.00016 | | 0.0133 ± 0.0046 | | 13.77 ± 1.04 | | 13.37 ± 4.63 | |
| No.17 | 0.36 | 0.0643 ± 0.0211 | | 0.0021 ± 0.00018 | | 0.0188 ± 0.0062 | | 13.66 ± 1.14 | | 18.92 ± 6.24 | |
| No.18 | 0.33 | 0.0160 ± 0.0126 | | 0.0022 ± 0.00023 | | 0.0049 ± 0.0038 | | 14.26 ± 1.47 | | 4.94 ± 3.88 | Discordant |
| No.19 | 0.38 | 0.0449 ± 0.0252 | | 0.0023 ± 0.00027 | | 0.0143 ± 0.0080 | | 14.88 ± 1.77 | | 14.43 ± 8.08 | |
| No.20 | 0.32 | 0.0950 ± 0.0458 | | 0.0022 ± 0.00031 | | 0.0284 ± 0.0134 | | 13.95 ± 1.99 | | 28.40 ± 13.56 | |
| No.21 | 0.92 | 0.0742 ± 0.0282 | | 0.0033 ± 0.00033 | | 0.0333 ± 0.0126 | | 20.96 ± 2.13 | | 33.29 ± 12.75 | Excluded from mean |
| No.22 | 0.31 | 0.0609 ± 0.0372 | | 0.0020 ± 0.00029 | | 0.0165 ± 0.0099 | | 12.62 ± 1.87 | | 16.59 ± 10.04 | |
| No.23 | 0.75 | 0.0516 ± 0.0135 | | 0.0022 ± 0.00014 | | 0.0158 ± 0.0042 | | 14.34 ± 0.89 | | 15.96 ± 4.24 | |
| No.24 | 0.71 | 0.0533 ± 0.0190 | | 0.0020 ± 0.00017 | | 0.0150 ± 0.0053 | | 13.15 ± 1.09 | | 15.13 ± 5.40 | |
| No.25 | 0.30 | 0.1253 ± 0.0498 | | 0.0022 ± 0.00029 | | 0.0382 ± 0.0149 | | 14.22 ± 1.88 | | 38.02 ± 14.99 | Discordant |
| No.26 | 0.74 | 0.0346 ± 0.0118 | | 0.0021 ± 0.00014 | | 0.0099 ± 0.0034 | | 13.41 ± 0.90 | | 10.05 ± 3.44 | |
| No.27 | 0.32 | 0.0685 ± 0.0389 | | 0.0020 ± 0.00029 | | 0.0189 ± 0.0106 | | 12.85 ± 1.87 | | 18.97 ± 10.67 | |
| No.28 | 0.68 | 0.0402 ± 0.0161 | | 0.0020 ± 0.00017 | | 0.0113 ± 0.0045 | | 13.11 ± 1.08 | | 11.40 ± 4.57 | |
| No.29 | 0.42 | 0.0688 ± 0.0342 | | 0.0023 ± 0.00030 | | 0.0221 ± 0.0109 | | 14.99 ± 1.91 | | 22.16 ± 10.97 | |
| No.30 | 0.69 | 0.0559 ± 0.0169 | | 0.0020 ± 0.00015 | | 0.0155 ± 0.0047 | | 12.94 ± 0.94 | | 15.60 ± 4.75 | |
| <i>Weighted mean of the youngest group (n = 26)</i> | | | | | | | | 13.7 ± 0.3 | | 14.4 ± 1.2 | |
| Standards (PSV: Plešovice, OD3: OD-3) | | | | | | | | | | | |
| PSV 4-1 | 0.09 | 0.0543 ± 0.0045 | 0 | 0.0513 ± 0.00162 | 0 | 0.3841 ± 0.0394 | | 322.4 ± 10.4 | | 330.0 ± 39.19 | |
| OD3 4-1 | 0.93 | 0.0432 ± 0.0111 | 0 | 0.0051 ± 0.00029 | 0 | 0.0304 ± 0.0080 | | 32.8 ± 1.89 | | 30.4 ± 8.07 | |

付表A2 全ジルコン粒子のFT分析データ

Table A2 Fission-track data of zircon grains

| Sample Grain No | Fission Track Data | | | LA-ICPMS Data | | Calculated | | |
|--------------------|--------------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------|---------------|---------------|
| | N_s | Area (10^6 cm^2) | ρ_s (10^6 cm^{-2}) | Area-corrected N_{u-sp} | ρ_{u-sp} (10^{10} cm^{-2}) | U_{ICP} (ppm) | Age (Ma) t | $\pm 2\sigma$ |
| 180607-1 | $\rho_{u-std} = 5.575 \times 10^9 / \text{cm}^2$ | | | $\zeta_{is} = 54.6 \pm 1.6 (1\sigma)$ | | | | |
| 1 | 13 | 9.0 | 1.44 | 189913 | 2.110 | 280 | 10.4 | 5.8 |
| 2 | 11 | 9.0 | 1.22 | 177087 | 1.968 | 261 | 9.4 | 5.7 * |
| 3 | 4 | 9.0 | 0.44 | 118607 | 1.318 | 175 | 5.1 | 5.1 |
| 4 | 13 | 9.0 | 1.44 | 83254 | 0.925 | 123 | 23.7 | 13.2 |
| 5 | 20 | 9.0 | 2.22 | 357873 | 3.976 | 528 | 8.5 | 3.8 * |
| 6 | 15 | 9.0 | 1.67 | 215882 | 2.399 | 318 | 10.6 | 5.5 |
| 7 | 46 | 9.0 | 5.11 | 700093 | 7.779 | 1033 | 10.0 | 3.0 * |
| 8 | 9 | 9.0 | 1.00 | 72312 | 0.803 | 107 | 18.9 | 12.7 * |
| 9 | 49 | 4.0 | 12.25 | 616720 | 15.418 | 2047 | 12.1 | 3.5 |
| 10 | 7 | 6.0 | 1.17 | 103352 | 1.723 | 229 | 10.3 | 7.8 |
| 11 | 16 | 9.0 | 1.78 | 222033 | 2.467 | 327 | 11.0 | 5.5 |
| 12 | 17 | 9.0 | 1.89 | 188731 | 2.097 | 278 | 13.7 | 6.7 |
| 13 | 4 | 9.0 | 0.44 | 107397 | 1.193 | 158 | 5.7 | 5.7 * |
| 14 | 7 | 9.0 | 0.78 | 87758 | 0.975 | 129 | 12.1 | 9.2 |
| 15 | 13 | 9.0 | 1.44 | 142616 | 1.585 | 210 | 13.9 | 7.7 |
| 16 | 5 | 9.0 | 0.56 | 102536 | 1.139 | 151 | 7.4 | 6.6 * |
| 17 | 5 | 9.0 | 0.56 | 88696 | 0.986 | 131 | 8.6 | 7.7 * |
| 18 | 5 | 9.0 | 0.56 | 68027 | 0.756 | 100 | 11.2 | 10.0 |
| 19 | 39 | 6.0 | 6.50 | 574646 | 9.577 | 1271 | 10.3 | 3.4 * |
| 20 | 8 | 9.0 | 0.89 | 178277 | 1.981 | 263 | 6.8 | 4.8 |
| 21 | 11 | 6.0 | 1.83 | 127847 | 2.131 | 283 | 13.1 | 7.9 |
| 22 | 7 | 6.0 | 1.17 | 56073 | 0.935 | 124 | 19.0 | 14.4 |
| 23 | 33 | 9.0 | 3.67 | 465021 | 5.167 | 686 | 10.8 | 3.8 |
| 24 | 13 | 6.0 | 2.17 | 176922 | 2.949 | 391 | 11.2 | 6.2 |
| 25 | 12 | 9.0 | 1.33 | 202869 | 2.254 | 299 | 9.0 | 5.2 |
| 26 | 5 | 6.0 | 0.83 | 68244 | 1.137 | 151 | 11.1 | 10.0 * |
| 27 | 5 | 6.0 | 0.83 | 128653 | 2.144 | 285 | 5.9 | 5.3 |
| 28 | 4 | 6.0 | 0.67 | 63013 | 1.050 | 139 | 9.7 | 9.7 * |
| 29 | 24 | 6.0 | 4.00 | 334750 | 5.579 | 741 | 10.9 | 4.5 * |
| 30 | 19 | 6.0 | 3.17 | 251915 | 4.199 | 557 | 11.5 | 5.3 |
| Pooled (n= 11) | 172 | 87 | 1.98 | 2646646 | 3.199 | 425 | 9.9 | 1.7 |
| 170516-1 | $\rho_{u-std} = 4.717 \times 10^9 / \text{cm}^2$ | | | $\zeta_{is} = 46.4 \pm 2.1 (1\sigma)$ | | | | |
| 1 | 11 | 16.0 | 0.69 | 125213 | 0.783 | 123 | 9.6 | 5.9 * |
| 2 | 18 | 16.0 | 1.13 | 175524 | 1.097 | 172 | 11.2 | 5.4 * |
| 3 | 11 | 16.0 | 0.69 | 103643 | 0.648 | 102 | 11.6 | 7.1 |
| 4 | 36 | 16.0 | 2.25 | 234187 | 1.464 | 230 | 16.8 | 5.8 * |
| 5 | 23 | 16.0 | 1.44 | 160683 | 1.004 | 158 | 15.7 | 6.7 * |
| 6 | 17 | 16.0 | 1.06 | 120497 | 0.753 | 118 | 15.4 | 7.6 * |
| 7 | 22 | 16.0 | 1.38 | 146435 | 0.915 | 144 | 16.4 | 7.2 * |
| 8 | 84 | 16.0 | 5.25 | 808526 | 5.053 | 793 | 11.4 | 2.7 * |
| 9 | 24 | 9.0 | 2.67 | 178176 | 1.980 | 311 | 14.7 | 6.2 * |
| 10 | 36 | 16.0 | 2.25 | 194448 | 1.215 | 191 | 20.2 | 7.0 * |
| 11 | 17 | 9.0 | 1.89 | 197023 | 2.189 | 343 | 9.4 | 4.7 * |
| 12 | 18 | 12.0 | 1.50 | 169121 | 1.409 | 221 | 11.6 | 5.6 * |
| 13 | 41 | 16.0 | 2.56 | 256159 | 1.601 | 251 | 17.5 | 5.7 * |
| 14 | 40 | 12.0 | 3.33 | 212230 | 1.769 | 277 | 20.6 | 6.8 * |
| 15 | 39 | 16.0 | 2.44 | 351692 | 2.198 | 345 | 12.1 | 4.0 * |
| 16 | 34 | 12.0 | 2.83 | 333902 | 2.783 | 437 | 11.1 | 3.9 * |
| 17 | 28 | 12.0 | 2.33 | 271323 | 2.261 | 355 | 11.3 | 4.4 * |
| 18 | 38 | 16.0 | 2.38 | 252373 | 1.577 | 247 | 16.5 | 5.5 |
| 19 | 15 | 12.0 | 1.25 | 140768 | 1.173 | 184 | 11.7 | 6.1 * |
| 20 | 29 | 16.0 | 1.81 | 149767 | 0.936 | 147 | 21.2 | 8.1 * |
| 21 | 19 | 16.0 | 1.19 | 216606 | 1.354 | 212 | 9.6 | 4.5 |
| 22 | 23 | 16.0 | 1.44 | 159567 | 0.997 | 156 | 15.8 | 6.7 * |
| 23 | 43 | 9.0 | 4.78 | 494678 | 5.496 | 862 | 9.5 | 3.0 * |
| 24 | 67 | 16.0 | 4.19 | 524044 | 3.275 | 514 | 14.0 | 3.6 * |
| 25 | 30 | 16.0 | 1.88 | 178152 | 1.113 | 175 | 18.4 | 6.9 |
| 26 | 67 | 16.0 | 4.19 | 842330 | 5.265 | 826 | 8.7 | 2.3 * |
| 27 | 21 | 16.0 | 1.31 | 177327 | 1.108 | 174 | 13.0 | 5.8 * |
| 28 | 37 | 12.0 | 3.08 | 384930 | 3.208 | 503 | 10.5 | 3.6 * |
| 29 | 24 | 16.0 | 1.50 | 170738 | 1.067 | 167 | 15.4 | 6.4 * |
| 30 | 57 | 16.0 | 3.56 | 606474 | 3.790 | 595 | 10.3 | 2.9 * |
| Pooled (n= 26) | 871 | 371 | 2.35 | 7585761 | 2.107 | 331 | 12.6 | 1.4 |

N_s , Number of spontaneous tracks; ρ_s , spontaneous track density; N_{u-sp} , total count of ^{238}U ; ρ_{u-sp} , ^{238}U -count density; sp, sample; std, standard; U_{ICP} , uranium concentration; *, zircon grains of youngest cluster with U-Pb age