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

Zircon fission-track and U–Pb ages of the Green Tuff in Nishiwaga Town, Iwate Prefecture, and their implications

Abstract

細井 淳¹ 中嶋 健² 檀原 徹³
岩野英樹³ 平田岳史⁴ 天野一男⁵

*Jun Hosoi¹, Takeshi Nakajima²,
Tohru Danhara³, Hideki Iwano³,
Takafumi Hirata⁴ and Kazuo Amano⁵*

2017年12月6日受付.

2018年5月24日受理.

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

Institute of Geology and Geoinformation,
Geological Survey of Japan, AIST, 1-1-1, Higashi,
Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan

² 産業技術総合研究所地質調査総合センター地圏資源環境研究部門

Institute for Geo-Resources and Environment,
Geological Survey of Japan, AIST, 1-1-1, Higashi,
Tsukuba, Ibaraki 305-8567, Japan

³ 株式会社フィッション・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 University of Tokyo, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

⁵ 日本大学文理学部自然科学研究所

The Institute of National Sciences, College of Humanities and Sciences, Nihon University, 3-25-40, Sakurajosui, Setagaya-ku, Tokyo 156-8550, Japan

Corresponding author: J. Hosoi,
j.hosoi@aist.go.jp

We carried out fission-track (FT) and U–Pb double dating on zircon grains from six Green Tuff samples collected from Nishiwaga Town, Iwate Prefecture (northeast Japan). Based on these data, our revised stratigraphy is as follows: the Oarasawa Formation (the early Miocene ca. 20–18 Ma), which unconformably overlies the Paleozoic and Mesozoic basement; the main part of the Oishi Formation (16–15.4 Ma), which unconformably overlies the Oarasawa Formation; the Kawashiri Tuff Member (15.4–13.6 Ma) of the upper part of the Oishi Formation; and the Kotsunagizawa Formation (13.6–12 Ma), which conformably overlies the Oishi Formation. These results, which are consistent with the recently revised stratigraphy for the type section of the Green Tuff on Oga Peninsula, indicate that a tectonic change which is coupled with rapid tectonic subsidence started at ca. 16 Ma, accompanied by active felsic volcanism and counterclockwise rotation of the region at ca. about 15.4–13.6 Ma, and then ended at ca. 12 Ma in the study area.

Keywords: Green tuff, Miocene, fission-track age, U–Pb age, double dating, zircon

はじめに

東北日本には古～新第三紀の日本海拡大期の地層が広く分布している。このうち、中期中新世の海成層(女川層)より下位の地層は火山岩、火山砕屑岩を主としており、その多くが熱水変質を被り、緑色を呈していることからグリーンタフと呼ばれてきた(佐川, 1898; 後アルプス総合研究グループ編, 1966; 大沢, 1968; 島津, 1991 など)。本論でも従来の慣例に従い、岩相を問わず女川層層準より下位の新生界をグリー

ンタフと呼ぶ。これらの地層については、古くから層序学的研究が盛んに行われ、特に北村(1959)などの研究により、本研究地域の岩手県西和賀町を含む奥羽脊梁山脈の横黒線(北上線)一帯の層序は、グリーンタフの標準層序とみなされてきた。その後、北村編(1986)は東北日本全域にわたる新生界の層序を、岩相層序のみならず微化石や放射年代測定データを加え、年代層序の観点から再構築した。それ以降、東北日本の新生代テクトニクスは、この年代層序区分、つまり時階区分に従って考察されている(天野・佐藤, 1989 や

Fig. 1. Simplified geological map of central northeast Japan (after Wakita et al., 2009).

Sato and Amano, 1991 など)。

男鹿半島をはじめとする日本海沿岸の堆積盆では、近年の放射年代測定研究とともにグリーンタフの層序が大幅に修正され (Kano et al., 2007; 鹿野ほか, 2008, 2011, 2012a; 小林ほか, 2004, 2008), 従来、前期中新世と考えられてきたグリーンタフ下部は、後期始新世～前期漸新世まで遡ることが判明した。これらの研究は、標準層序とされてきた横黒線沿線のグリーンタフをはじめとして、全国のグリーンタフの層序を、新たな年代測定により再検討する余地があることを示唆している。

これまでのグリーンタフの年代は、岩相層序と主にグリーンタフ上部の限られた層準に産出する微化石データに基づいて決められてきた。1980 年頃には、火山岩を対象に K–Ar 法やフィッション・トラック (FT) 法を用い、グリーンタフの放射年代が求められるようになった。しかし、K–Ar や FT 年代測定は変質や熱の影響を受けやすく、熱水変質作用を被ったグリーンタフへの適用は難しかった。例えば、安斎・板谷 (1990) は本研究地域の火山岩を対象に K–Ar 年代測定を実施したが、その結果は微化石層序から検討される年代より明らかに若い年代を示し、噴出年代を求められなかった。近年では放射年代測定の技術向上により、詳細な年代を求めることができるようになってきた。例えば、岩野ほか (2012) は同一ジルコンから FT と U–Pb 年代測定を行うダブル年代測定を行った。この手法を用いれば、同一のジルコンから閉鎖温度の異なる 2 つの年代を求めることによって、

岩石の正確な形成年代を議論できるほか、岩石が被った熱履歴も考察することができる (例えば、檀原ほか, 2005; 鹿野ほか, 2012b; 星ほか, 2016)。

一般にグリーンタフ地域では、被覆層のために、グリーンタフ下部とその直下の基盤岩が地表に露出することは稀であるが、本研究地域の岩手県西和賀町は、基盤岩とそれを不整合に覆うグリーンタフが連続して分布する数少ない地域である (Fig. 1, 2)。この地域では、グリーンタフの一連の層序が観察できるため古くから様々な研究が行われた。本地域の層序学的研究は村山 (1937) に始まる。その後、井尻 (1941) によって概括的な層序区分がなされ、早川ほか (1954)、北村 (1959)、秋葉ほか (1966)、藤田ほか (1966)、大沢ほか (1971)、白田ほか (1986) などが層序を検討した。碎屑岩からは微化石が産出し、生層序学的研究が行われた (Saito, 1963; 佐藤ほか, 1991)。その他、放射年代測定 (鈴木, 1982; 玉生, 1978; 安斎・板谷, 1990; 中嶋・檀原, 1999) や変質の調査 (金原ほか, 1976) も行われている。2000 年頃には、中期中新世以降の碎屑岩を対象に精密な野外調査と放射年代測定が行われ、奥羽脊梁山脈の隆起に関する議論がなされた (中嶋ほか, 2000; Nakajima et al., 2006)。近年では、細井・天野 (2013) が本地域のグリーンタフを対象に堆積相解析を実施し、古火山活動と堆積盆発達史を考察した。Hosoi et al. (2015) は古地磁気・岩石磁気測定を行い、回転運動とテクトニックな沈降、火山活動が密接に関係していることを明らかにした。以上のように本地域では様々な研究がな

Fig. 2. Geological map (A) and correlated columnar section (B) of the study area (modified after Hosoi and Amano, 2013). The locations and stratigraphic horizons of the analyzed samples (U-Pb and fission track (FT) dating) are shown.

されてきたにもかかわらず、グリーンタフに関する年代データは必ずしも十分ではなく、精確な年代は不明である。その為、グリーンタフ堆積期の古火山活動や回転運動、沈降運動の精確な時期の解明には至っていない。

本論文では岩手県西和賀町に分布するグリーンタフを対象に、FT と U-Pb のダブル年代測定を実施し、詳細な年代層序を構築するとともに、奥羽脊梁山脈に分布するグリーンタフのテクトニクス(細井・天野, 2013; Hosoi et al., 2015)を再検討する。

地 質 概 説

本調査対象地域の岩手県西和賀町は奥羽脊梁山脈の中軸に位置する(Fig. 1)。東側にはN-S方向に伸びる仙人断層があり、その断層西側に中生界の基盤岩類とグリーンタフが分布する(Fig. 2)。奥羽脊梁山脈には、川舟断層や上平断層、出店断層などのN-S方向の逆断層があり、これらの多くはグリーンタフ堆積時に形成された正断層がその後、逆断層として再活動したものとされている(Sato et al., 2002; Kato et al., 2006; 佐藤・加藤, 2010)。断層西側に基盤岩が分布しグリーンタフの分布を境する仙人断層も、その一つである可能性が考えられ、細井・天野(2013)はこれらの断層データと堆積相の分布を踏まえ、東下がりの堆積盆をグリーンタフが埋積したものと考えた。調査地域のグリーンタフは、下位から大荒沢層、大石層主部、大石層川尻凝灰岩部層、小繫沢層に区分される(細井・天野, 2013)(Fig. 2)。

大荒沢層は古〜中生界の基盤岩類を不整合に覆い、主に安山岩とその火山碎屑岩、礫岩、砂岩から構成される。細井・天野(2013)によれば、当時、成層火山型の安山岩海底火山が活動し、火山体の周辺には礫岩や砂岩が堆積した。調査地南方の胆沢川上流からは台島型植物化石が報告されている(大口ほか, 1985)。鈴木(1982)は 25.1 ± 0.7 MaのFT年代値を報告しているが、このデータはゼータ法による年代標準化(Hurford, 1990a, b)がされておらず、年代について評価することができない。そのため大荒沢層からは、詳細な年代の決め手となるデータがこれまで得られていない。

大石層は大荒沢層を被覆し、主部と上部の川尻凝灰岩部層に区分される。大石層主部は浅海〜漸深海帯の砂岩、泥岩を主体とし、陸上から供給された凝灰岩、火山礫凝灰岩が間に挟まる(細井・天野, 2013)。泥岩からは海棲軟体動物化石(北村, 1959; 北村・武藤, 1962; 松隈, 1969)、有孔虫化石(北村, 1959; Saito, 1963; 大沢ほか, 1971)、石灰質ナノ化石(佐藤ほか, 1991)が報告されている。浮遊性有孔虫化石と石灰質ナノ化石はそれぞれBlow(1969)のN8帯とMartini(1971)のNN4帯を示し、Anthonissen and Ogg(2012)の化石帯の年代に従うと、それぞれ16.38–15.10 Ma、17.95–14.91 Maである。少なくとも本層は16.4–15.1 Maの間堆積していたと考えられるが、大石層主部の下限と上限の精確な年代は不明である。下位の大荒沢層との層序関係は、整合とされていたが(北村, 1959; 大沢ほか, 1971など)、不整合とする意見もあった(安斎, 1989)。細井・天野(2013)は再調査結果に基づいて、両者の関係を一

部指交関係と考えた。

大石層上部の川尻凝灰岩部層は主に軽石凝灰岩と流紋岩から構成される。川尻凝灰岩部層の下部は水中の比較的大規模な爆発的噴火であるNeptunian噴火(Allen and McPhie, 2009)の堆積物であり、上部は溶岩ドームとそれに関連した比較的小規模な水中噴火堆積物から構成される(細井・天野, 2013)。有孔虫化石がボーリング試料から報告されている(金属鉱物探鉱促進事業団, 1972, 1973; 金属鉱業事業団, 1974)が、川尻凝灰岩部層から有益な年代データは得られていない。

小繫沢層は大石層川尻凝灰岩部層を整合に被覆する。主に泥岩から構成され、凝灰岩や玄武岩火山碎屑岩が挟在する(中嶋ほか, 2000; Nakajima et al., 2006)。貝化石(北村, 1959; 中嶋ほか, 2000)や有孔虫化石(金属鉱物探鉱促進事業団, 1971, 1972, 1973; 金属鉱業事業団, 1974; 白田・岡本, 1986; 白田ほか, 1986)、石灰質ナノ化石(佐藤ほか, 1991)など様々な化石が報告されている。小繫沢層下部〜中部はBlow(1969)のN10帯(14.24–13.77 Ma)に、上部がN13–14帯(11.79–10.46 Ma)に相当し、小繫沢層全体がMartini(1971)のNN6帯(13.53–11.90 Ma)に相当する。中嶋・檀原(1999)、Nakajima et al.(2006)は泥岩に挟在する凝灰岩のFT年代測定を行い、小繫沢層下部から 14.0 ± 1.1 Ma、上部からは 11.1 ± 0.7 Maの年代値を報告した。小繫沢層の年代はおおよそ14–11 Maと考えられる。

年 代 測 定

1. 年代測定試料

各層の精確な年代を求めるために、大荒沢層、大石層主部、大石層川尻凝灰岩部層から合計6試料を採取した。各試料の採取位置とその層準をFig. 2に示す。大荒沢層からは下部と上部の安山岩溶岩を採取した。それぞれの試料名は大荒沢層下部の試料がOA-a5、上部がOA-a1である。これらの安山岩は直径1–4 mm大の斜長石斑晶と1 mm前後の変質鉱物に置換された輝石斑晶を含む。暗緑色に変質した火山岩であり、古くから変朽安山岩(プロピライト)と呼ばれていた。大石層主部からは、下部と上部の火山碎屑岩を採取した。それぞれの試料名はOI-t6、OI-t1である。OI-t6およびOI-t1は軽石、火山礫、異質礫から構成されるラピリスストーン〜火山礫凝灰岩であり、陸上噴火起源の火砕流などが海底に流入し堆積したものである(細井・天野, 2013)。特徴として、本質岩片の他に異質岩片や材化石を含む。川尻凝灰岩部層からは上部の流紋岩を採取した(OK-r1, OK-r2)。流紋岩は強い変質を被っているものの、直径1–2 mm大の石英斑晶と斜長石斑晶が認められる。OK-r1とOK-r2はそれぞれ、細井・天野(2013)の貫入岩と溶岩ドームから採取した。これらの流紋岩は川尻凝灰岩部層の後期〜末期のものである。

2. FT年代測定

本研究では、レーザーアブレーション誘導結合プラズマ質量分析(LA-ICP-MS)法によるFTおよびU-Pbダブル年代測定を同一のジルコン結晶について実施した。抽出したジ

ルコン結晶からランダムに約 100 粒子を選び、外表面が露出するように PFA テフロンシートに埋め込み、ダイヤモンドペーストで研磨した。その後、KOH+NaOH 共融液 (225°C) を用い FT のエッチングを行った。次に、FT が等方的に分布するまでエッチングされた粒子を 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 (Danbara and Iwano, 2009) でジルコン内部面上の自発 FT 密度を測定した。

6 試料のうち 3 試料 (OA-a1, OI-t6, OK-r2) は U-Pb 年代分析後に、残りの 3 試料 (OA-a5, OI-t1, OK-r1) は U-Pb 年代と同時に FT 年代用ウラン濃度分析を行った。分析装置は京都大学地質学鉱物学教室の四重極型 ICP-MS (Thermo Fisher Scientific, iCAP-Qc) と、LA サンプリグ装置として ArF エキシマレーザー (New Wave Research NWR-193) またはフェムト秒レーザー (New Wave Research NWR Femto) を組み合わせた (Yokoyama et al., 2011; Sakata et al., 2014; Maruyama et al., 2016)。FT 分析でのレーザービーム径は 15 μm とした。測定装置の詳細および測定試料ごとの使用分析装置とその条件は Table 1, 2 に示す。FT 年代算出式については後述の通りである。ウラン濃度の標準物質として Nancy 91500 ジルコンスタンダード (Wiedenbeck et al., 1995)、年代較正の 1 次標準試料として 28.4 Ma の Fish Canyon Tuff (Danbara 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 年代測定用の 2 次標準試料として 61 Ma の Tardree Rhyolite、16 Ma の Buluk Member Tuff (Danbara and Iwano, 2013) を用いた。

FT 年代式は、Danbara and Iwano (2013) に従い、次のように与えられる：

$$t = \frac{1}{\lambda_D} \ln \left(1 + \frac{\lambda_D}{\lambda_f} C \cdot \frac{\rho_s}{U} \right) \quad (1)$$

ここで、 t は FT 年代、 λ_D は ^{238}U の全壊変定数 ($1.55125 \times 10^{-10} \text{ y}^{-1}$: Steiger and Jäger, 1977)、 λ_f は ^{238}U の自発核分裂壊変定数 ($8.5 \times 10^{-17} \text{ y}^{-1}$: Holden and Hoffman, 2000)、 C はその他の定数積、 ρ_s は自発トラック密度、 U は U 濃度 (ppm) である。本研究での LA-ICP-MS を用いた U 濃度評価は、U 濃度値が既知で濃度分布が均質な標準物質との相対測定で行なった。今回ジルコンの U 濃度標準物質として Nancy 91500 (破片ごとでは 74~100 ppm の幅があるが 1 破片内では均質な U 濃度をもつ) を採用した。LA-ICP-MS 分析では一般に、目的の同位体 (^{238}U) に対して主成分を構成する元素の中から内標準同位体 (^xX ; 例えばアバタイトなら $x=43$, $\text{X}=\text{Ca}$ となり、ジルコンなら $x=29$, $\text{X}=\text{Si}$ などで、他の元素・同位体でも可能) もモニターし、未知試料とスタンダードにおけるそれらの比 $[^{238}\text{U}/^x\text{X}]$ を測定する (Vermeesch, 2017)。同一マトリクスのスタンダードを用いた場合、未知試料とスタンダード間で主成分元素濃度が等しい

と仮定すると、測定した未知試料 (sp) と U 濃度スタンダード (U-std) 間の U 濃度の関係は次のようになる：

$$[^{238}\text{U}/^x\text{X}]_{\text{sp}} : [^{238}\text{U}/^x\text{X}]_{\text{U-std}} = ^{238}\text{U}_{\text{sp-true}} : ^{238}\text{U}_{\text{U-std-true}} \quad (2)$$

ここで $[\]$ で表された変数は LA-ICP-MS で得られた測定値を、 $^{238}\text{U}_{\text{sp-true}}$ と $^{238}\text{U}_{\text{U-std-true}}$ はそれぞれ測定試料とスタンダードの真の U 濃度値を意味する。

本研究では自発核分裂壊変定数に基づいた絶対年代較正の代わりにゼータ較正を選択した。これにより U 濃度の絶対値を求める必要がなくなる。ゼータ (ζ) 値には LA-ICP-MS による U 濃度分析にまつわる条件 (変数) だけでなく U 濃度スタンダードの標準値、壊変定数なども含めて定義される。これは従来の原子炉を使ったやり方と同じで、年代式は以下のようになる：

$$t = \frac{1}{\lambda_D} \ln \left(1 + \lambda_D \zeta_{\text{ICP}} \cdot \rho_s \cdot \frac{[^{238}\text{U}]_{\text{U-std}}}{[^{238}\text{U}]_{\text{sp}}^*} \right) \quad (3)$$

ここで、内部標準による補正を行った未知試料 ^{238}U シグナルを $[^{238}\text{U}]_{\text{sp}}^* (= [^{238}\text{U}]_{\text{sp}} [^x\text{X}]_{\text{U-std}} / [^x\text{X}]_{\text{sp}})$ と表わし、以下ではすべて内標準補正済みデータを扱うこととする。

原子炉内での熱中性子照射を用いた従来の FT 年代算出式では、 ^{238}U の自発トラック密度と ^{235}U の誘導トラック密度の測定が各粒子で同一面積だったことから、粒子データの合算が合理的かつ単純に行うことができた。その方法を踏襲することで、LA-ICP-MS-FT 法の粒子データでも自発トラック密度測定面積と LA 面積を同一に補正することで合算できることを以下に示す。

j 番目の粒子の自発トラック密度が計数面積 $A_j (\text{cm}^2)$ と計数した自発トラック数 $N_{s,j}$ (本) で与えられるとする。

$$\rho_{s,j} = \frac{N_{s,j}}{A_j} \quad (4)$$

一方、ウラン濃度測定のための LA 固定面積を $\alpha (\text{cm}^2)$ とすると、単位面積あたりのウランカウント数 $\rho_U (\text{count}/\text{cm}^2)$ は

$$\rho_U = \frac{[^{238}\text{U}]}{\alpha} \quad (5)$$

ここで、(4) (5) 式を (3) 式に代入し、年代測定試料の LA 面積を自発トラック測定面積にあわせるように補正すると以下のようになる：

$$t = \frac{1}{\lambda_D} \ln \left(1 + \lambda_D \zeta N_s \frac{\rho_{U-\text{std}}}{A \rho_{U-\text{sp}}} \right) \quad (6)$$

よって j 個の粒子を測定した場合、その合算したデータは次式で与えられる：

$$t = \frac{1}{\lambda_D} \ln \left(1 + \lambda_D \zeta \frac{\sum N_{s,j}}{\sum (A \rho_{U-\text{sp}})_j} \rho_{U-\text{std}} \right) \quad (7)$$

また、ゼータ値も同様に、合算データから算出できる：

$$\zeta = \frac{1}{\lambda_D} \frac{\sum (A\rho_{U_w})_j}{\sum Ns_j} \frac{1}{\rho_{U_{std}}} (\exp(\lambda_D \cdot t_{std}) - 1) \quad (8)$$

なお、年代値の誤差は、以下のように自発トラック計数誤差、ジルコンのウラン濃度測定誤差、ウラン濃度標準物質の分析誤差、ゼータ値の誤差(σ_ζ)を伝搬して与えられる。ただし本研究では、ウラン濃度測定にまつわる1スポット当たりのLA分析の誤差を $\pm 10\%$ (年代試料)、 $\pm 5\%$ (ウラン濃度標準物質)と仮定した：

$$\sigma = t \times \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{Ns}}\right)^2 + (0.1)^2 + (0.05)^2 + \left(\frac{\sigma_\zeta}{\zeta}\right)^2} \quad (9)$$

ゼータ値の誤差(σ_ζ)は、以下のように自発トラック計数誤差、ジルコンのウラン濃度測定誤差、ウラン濃度標準物質の分析誤差、基準年代値(t_{std})の誤差(σ_{t-std})を伝搬して与えられる。(9)式と同様に、ウラン濃度測定にまつわる1スポット当たりのLA分析の誤差を $\pm 10\%$ (年代標準試料)、 $\pm 5\%$ (ウラン濃度標準物質)と仮定した：

$$\sigma_\zeta = t \times \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{Ns}}\right)^2 + (0.1)^2 + (0.05)^2 + \left(\frac{\sigma_{t-std}}{t_{std}}\right)^2} \quad (10)$$

3. U-Pb 年代測定

LA-ICP-MS 法による U-Pb 年代測定を実施した。分析前処理にアルカリ溶液を用いた化学処理を施しているが、U-Pb 分析結果に影響はないことが明らかにされている(岩野ほか, 2012)。念のため鉛汚染源となるアルカリエッチャントを除去するために希塩酸(常温)で一晩洗浄後、蒸留水で再洗浄した。ICP-MS 装置は京都大学地質学鉱物学教室の二重収束型 ICP-MS (Nu Instruments AttoM) または四重極型 ICP-MS (Thermo Fisher Scientific, iCAP-Qc) を用い、LA サンプリグ装置は FT 用ウラン濃度測定に用いたものと同じである。本研究でのレーザービーム径は 15 μm または 20 μm とした。自発トラック密度を測定した領域内で内部(深部)にインクルージョンのない部位を選び、その表面の鉛汚染を避けるワンショットクリーニング(Iizuka and Hirata, 2004)を行った後、レーザー照射を 20 秒間行った。測定装置の詳細および測定試料ごとの使用分析装置とその条件は Table 1, 2 に示す。測定では ^{202}Hg , ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U をモニターし、 ^{238}U - ^{206}Pb 年代および ^{235}U - ^{207}Pb 年代を求めた。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、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=0.17917$ 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 Ma : 岩野ほか, 2012; Iwano et al., 2013) も分析した。OD-3 ジルコンについては最近、同位体希釈法(isotope dilution : ID)と表面電離型質量分析(TIMMS)の組み合わせによって得られる ID-TIMS U-Pb 年代(32.853 ± 0.016 Ma : Lukács et al., 2015)が最も信頼性の高い値として報告されている。年代誤差には試料の分析前後に測定した 91500 ジルコンの $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ および $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 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。なお、U-Pb 年代は ^{238}U - ^{206}Pb 年代を採用した。

ジルコン粒子のカソードルミネッセンス像は、LA-ICP-MS 分析後、産業技術総合研究所所有の走査型電子顕微鏡(Oxford Instrumental 社製, JSM-6610LV)を用いて撮影した。

測定結果

年代測定の結果は、測定した岩石の種類、つまり地層毎に同一の傾向が認められた。そこで、大荒沢層の安山岩(サンプル名 : OA-a1, OA-a5)、大石層主部の火山砕屑岩(OI-t1, OI-t6)、大石層川尻凝灰岩部層の流紋岩(OK-r1, OK-r2)に分けて結果を述べる。なお、FT および U-Pb 年代測定での年代誤差は 2σ で示した。年代測定結果を Table 3 に示す。

1. 安山岩(OA-a1, OA-a5)

本試料に含まれるジルコン粒子はいずれも破片状、摩耗状の形状であった(Fig. 3)。また、ジルコン含有量は非常に少なく、原岩 1 kg を処理して 60~70 粒程度得られた。ジルコン結晶には、120~106 Ma と 35~25 Ma の U-Pb 年代値を示す 2 種類が存在した(Table A1)。若い方のジルコン粒子集団のもつコンコールドな U-Pb 年代の加重平均値は、 30.2 ± 1.4 Ma (OA-a1) と 30.5 ± 0.5 Ma (OA-a5) となった(Fig. 3, Table A1)。一方の FT 年代値は全ジルコンの粒子年代が 10~30 Ma 頃にまとまり、その年代値は 18.0 ± 5.9 Ma (OA-a1), 20.5 ± 7.1 Ma (OA-a5) であった(Fig. 4, Table A2)。

2. 火山砕屑岩(OI-t1, OI-t6)

火山砕屑岩試料から得られたジルコン結晶のコンコールドな U-Pb 年代値は 263 Ma, 123~110 Ma, 17~14 Ma を示し、少なくとも 3 種類のジルコン結晶が含まれていた(Table A1)。本研究では、最も若いジルコン粒子集団のコンコールドな U-Pb 年代の加重平均値を各試料の代表値とし、それぞれ 15.7 ± 0.3 Ma (OI-t1), 15.7 ± 0.7 Ma (OI-t6) が得られた(Fig. 3, Table A1)。一方 FT 年代を見ると、両試料ともに古い U-Pb 年代をもつ外来粒子はリセットされていない(Fig. 4, 5)。そこで最若 U-Pb 年代を示す粒子集団を対象に FT 年代値を求め、それぞれ 17.9 ± 7.8 Ma (OI-t6), 11.8 ± 4.3 Ma (OI-t1) を得た(Table A2)。

3. 流紋岩(OK-r1, OK-r2)

本流紋岩試料は原岩 0.3 kg から 1000~2000 粒の豊富なジルコン結晶が得られ、そのジルコン結晶は均質な自形ジルコン結晶である(Fig. 3)。ジルコン結晶の U-Pb 年代値は全て 12~15 Ma 間に収まり、コンコールドな U-Pb 年代の加重平均値として 13.7 ± 0.2 Ma (OK-r1) と 13.9 ± 0.3 Ma (OK-r2) が得られた(Fig. 3, Table A1)。流紋岩という岩質と U-Pb 年代分布から見て外来粒子は含まれないと考えられることから、FT 年代は全ジルコン粒子から求め、それぞれ 13.6 ± 4.4 Ma (OK-r1) と 12.6 ± 4.1 Ma (OK-r2) となった(Fig. 4, Table A2)。

Table 1. Instrumentation and operating conditions for LA-ICP-MS analysis.

Laser ablation (1)	
Model	New Wave Research NWR Femto
Laser type	Femtosecond
Energy density	see Table 2
Crater size	see Table 2
Repetition rate	see Table 2
Carrier gas	He
Laser ablation (2)	
Model	New Wave Research NWR-193
Laser type	Excimer ArF (193 nm)
Energy density	see Table 2
Crater size	see Table 2
Repetition rate	see Table 2
Carrier gas	He
ICP-MS (1)	
Model	Nu Instruments AttoM
ICP-MS type	Magnetic sector field
Forward power	1300 W
Carrier gas	Ar
Ar gas flow rate	see Table 2
He gas flow rate	see Table 2
Scanning mode	Deflector jump
Data acquisition protocol	Batch
Integration time	8 s
Monitor isotopes	^{202}Hg , ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U
Primary standard	Nancy 91500 *1
Secondary standard	OD-3 *2, 3, 4
ICP-MS (2)	
Model	Thermo Fisher Scientific iCAP-Qc
ICP-MS type	Quadrupole
Forward power	1400 W
Carrier gas	Ar
Ar gas flow rate	see Table 2
He gas flow rate	see Table 2
Scanning mode	Standard mode (no collision gas was used)
Data acquisition protocol	Time-resolved analysis
Integration time	35 s
Monitor isotopes	^{29}Si , ^{202}Hg , ^{204}Pb , ^{206}Pb , ^{207}Pb , ^{208}Pb , ^{232}Th , ^{238}U
Primary standard	Fish Canyon Tuff *5 (Age), Nancy 91500 *1 (U-Pb)
Secondary standard	Tardree Rhyolite *5, Buluk Member Tuff *5 (FT), OD-3 *2, 3, 4 (U-Pb)

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

議 論

1. 大荒沢層の放射年代測定値

大荒沢層が不整合に覆う基盤岩は、黒色粘板岩主体の古生層とそれを貫く花崗閃緑岩である(大沢ほか, 1971)。古生層からはペルム紀を示すサンゴ化石(北村・谷, 1953)が、花崗閃緑岩から 99 Ma の K-Ar 年代値(河野・植田, 1966)と 109.2 ± 0.8 Ma のジルコン U-Pb 年代値(早坂ほか, 2015)、 109.2 ± 2.1 Ma の トール石 U-Th-total Pb 年代値(Yokoyama et al., 2016)が報告されている。大荒沢層の安山岩試料から得られたジルコン粒子の U-Pb 年代は、120–106 Ma と 35–25 Ma に二分できる(Fig. 5, Table A1)。このうち 120–106 Ma 頃を示すジルコン結晶は上述の花崗閃緑岩の年代とほぼ一致するため、基盤岩の花崗閃緑岩起源の可能性が高い。一方の 30 Ma 頃を示すジルコン結晶の多くはコンコードント年代を示すが、いずれのジルコン結晶も摩耗状

や破片状の結晶であった(Fig. 3)。また、大荒沢層から前期中新世の台島型植物化石が報告されており(大口ほか, 1985)、その産出層準下限の年代は約 23 Ma である(鹿野・柳沢, 1989; 鹿野ほか, 2013)。これらを踏まえると、30 Ma 頃を示すジルコン結晶も外来結晶と解釈できる。近年、東北日本では 30 Ma 頃に火成活動があったことがわかってきた(鹿野ほか, 2011 など)。調査地域内に 30 Ma 頃の年代を示す岩石は露出しないが、地下には同時期の火成岩があり、大荒沢層の安山岩マグマはこの火成岩と基盤岩の白亜系花崗閃緑岩を取り込んだ可能性がある。

大荒沢層上部および下部から得られた FT 年代値はそれぞれ約 18 Ma と約 20 Ma で、外来結晶とみなしたジルコンの U-Pb 年代(30 Ma)より若く、層序的にも矛盾はない。しかし安山岩形成以降の再加熱による FT 年代値の若返りの有無が、本値の解釈に大きな影響を与える。安山岩冷却後 FT 年代を若返らせるほどの熱影響がないとするならば、本研究で得られた FT 年代値は大荒沢層上部および下部の堆積年代に近いと判断される。金原ほか(1976)は、大荒沢層の安山岩が緑泥石-緑簾石-セリサイト-曹長石の変質鉱物組み合わせに特徴づけられ、熱水変質作用の一種のプロピライト変質作用(Meyer and Hemley, 1967)を被っているとした。熱水変質作用によって生成する緑簾石やセリサイトは、少なくとも 200 度以上の温度環境下によって生成される(White and Hedenquist, 1995; 吉村, 2001)。仮にこの熱水変質作用によって FT 年代の若返りがあったとすると、得られた年代値はみかけとなり、大荒沢層の堆積年代は FT 年代より古いことになる。ジルコン FT のアニーリングは 200°C ほどの比較的低温の場合、数百万年という長時間加熱時間が必要となるが(Tagami et al., 1998 など)、大荒沢層の安山岩試料が受けた熱水変質作用の継続時間は不明である。本ジルコン試料は分析粒子数が少なく、再加熱の影響について検討するための FT 長測定は行うことができなかった。

以上をまとめると、大荒沢層の正確な年代は求めることが出来ないが、少なくとも FT 年代(20–18 Ma)に近いかそれより古く、U-Pb 年代(30 Ma)より新しいものと考えられる。

2. 大石層主部の放射年代測定値

大石層から採取した試料は共にラピリスストーン〜火山礫凝灰岩であり、陸上から供給された火砕流等が海底に流入した火山砕屑岩である(細井・天野, 2013)。そのため異質岩片起源の外来ジルコン結晶を含む可能性が高い。ジルコン U-Pb 年代から 263 Ma, 123–110 Ma, 17–14 Ma を示す 3 つの集団が認められた(Fig. 5, Table A1)。このうち、263 Ma と 110 Ma 頃の年代は、それぞれ基盤岩を構成するペルム紀の古生層と白亜紀の花崗閃緑岩の年代と一致するため、これらの年代を示すジルコン結晶は基盤由来の外来結晶と考えられる。大石層主部の下部と上部から U-Pb 年代で約 16 Ma を示すジルコン結晶を識別できた。これらは均質な色調と晶癖をもつ自形結晶で、本質結晶の可能性はある(Fig. 3)。一方 FT 年代値は、大石層主部の下部と上部からそれぞれ 17.9 ± 7.8 Ma と 11.8 ± 4.3 Ma が得られた。上部の FT 年

Table 2. Operating conditions for LA-ICP-MS analysis of each sample.

Sample	Laser ablation				ICP-MS		
	Laser type	Energy density (J/cm ²)	Spot size (μm)	Repetition rate (Hz)	Model	Ar gas flow rate (L/min)	He gas flow rate (L/min)
OA-a1 (FT)	Femtosecond	1.8	15	5	iCAP-Qc	0.77	0.50
OA-a1 (U-Pb)	Femtosecond	2.0	15	5	Attom	0.76	0.50
OA-a5 (FT and U-Pb)	Excimer ArF	3.2	15	5	iCAP-Qc	0.81	0.53
OI-t1 (FT and U-Pb)	Excimer ArF	3.2	15	5	iCAP-Qc	0.81	0.53
OI-t6 (FT)	Femtosecond	2.0	15	5	iCAP-Qc	0.82	0.53
OI-t6 (U-Pb)	Femtosecond	2.0	20	8	Attom	0.68	0.60
OK-r1 (FT and U-Pb)	Excimer ArF	3.2	15	5	iCAP-Qc	0.81	0.53
OK-r2 (FT)	Femtosecond	2.0	15	5	iCAP-Qc	0.82	0.53
OK-r2 (U-Pb)	Femtosecond	2.0	20	8	Attom	0.68	0.60

Table 3. Summary of zircon fission-track (FT) and U-Pb age data.

Fission Track Data					LA-ICPMS Data							
Sample name	Surface	n	Sample		U-standard				r	Uranium content (ppm)	FT ages ±2σ (Ma)	U-Pb ages ±2σ (Ma)
			ρ _s (×10 ⁶ cm ⁻²)	N _s	ρ _{Usp} (×10 ¹¹ cm ⁻²)	N _{Usp}	ρ _{Ustd} (×10 ¹¹ cm ⁻²)	N _{Ustd}				
OA-a1	Int.S.	21	0.995	427	0.283	12135179	0.2544	44942	0.949	100	18.0 ± 5.9	30.2 ± 1.4
OA-a5	Int.S.	16	1.05	203	4.02	77569736	4.330	21245	0.755	90	20.5 ± 7.1	30.5 ± 0.5
OI-t1	Int.S.	8	1.50	120	9.956	79647146	4.330	21245	0.986	220	11.8 ± 4.3	15.7 ± 0.3
OI-t6	Int.S.	3	1.18	46	0.216	841678	0.1728	30519	0.401	120	17.9 ± 7.8	15.7 ± 0.7
OK-r1	Int.S.	18	1.41	719	8.168	415764948	4.330	21245	0.962	180	13.6 ± 4.4	13.7 ± 0.2
OK-r2	Int.S.	30	1.52	952	0.394	24714506	0.1728	30519	0.626	210	12.6 ± 4.1	13.9 ± 0.3

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_{Usp}: Density of area-corrected total count of U²³⁸ on unknown sample

N_{Usp}: Area-corrected total count of U²³⁸ on unknown sample

ρ_{Ustd}: Density of total count of U²³⁸ on U-standard sample

N_{Ustd}: Total count of U²³⁸ on U-standard sample

r: correlation coefficient between ρ_s and ρ_u

代値は同試料のU-Pb年代値や上位の小繫沢層の年代(後述)と誤差範囲(2σ)で一致するが、やや若い年代を示している(Fig. 5)。FT年代値はU-Pb年代値より閉鎖温度が低いいため堆積年代に近い値を示す可能性があるが、堆積後の変質作用によって若返った年代を示している可能性も捨てきれない。FT長の検討が今後必要である。

以上より、大石層主部の放射年代値としてU-Pb年代値を採用し、約16 Maと考えた。

3. 大石層川尻凝灰岩部層上部の放射年代測定値

本部層上部から採取した流紋岩試料のU-Pb年代値(約14 Ma)とFT年代値(約14–12 Ma)は2σの誤差範囲内で一致する。本試料は溶岩ドームおよび潜在円頂丘の試料である。噴出(貫入)年代はマグマの冷却速度の見積りが必要だが、少なくともU-Pb年代値(マグマ中でジルコン結晶が形成された年代)からFT年代値(マグマの噴出、貫入後、冷却

された年代)までが噴出年代と考えられる。川尻凝灰岩部層上部の放射年代値はおおよそ約14–12 Ma(誤差を踏まえると、約14–8.5 Ma)と見積もることができる。

4. 層序の再検討

本研究で得られた年代データに基づき、再検討した層序をFig. 6に示す。大荒沢層と大石層の地層境界付近は露出が悪く、また褶曲構造が認められるため、層序関係の見極めは容易ではない。北村(1965)は、大荒沢層上部に上位層の凝灰岩が挟まることから、指交していると考え、細井・天野(2013)は、大荒沢にて被覆関係を確認し、また各沢柱状図から大石層下部と大荒沢層が同一層準であると考え、両者が一部指交しているとした。しかし今回得られた年代測定結果は測定誤差を考慮しない場合、大荒沢層上部の年代は若く見積もって約18 Maであり、大石層下部(16 Ma頃)との間に有意な時間間隔があると解釈した(Fig. 2)。また、大荒沢層

Oishi Fm. Kawashiri Tuff Mb. **Oishi Fm. main part** **Oarasawa Fm.**

Fig. 3. U-Pb zircon concordia diagrams and representative cathodoluminescence (CL) images of zircons for the youngest cluster of concordant U-Pb ages. White scale bar = 50 μ m.

の傾斜は平均的に約 30~50 度西傾斜であるのに対し、大石層は 20 度前後の西傾斜である。大石層は大荒沢層に指交しているのではなく、オンラップの関係であり、大荒沢層と大石層は不整合関係と考えられる。大荒沢層は海成層であるのに対し、大石層の最下部が少なくとも一部陸成層であるが(細井・天野, 2013), 両者の層序関係が不整合であれば矛盾しない。

大石層主部からは N8 帯の浮遊性有孔虫(Saito, 1963)と NN4 帯の石灰質ナノ化石(佐藤ほか, 1991)が産出し、大石層主部の古地磁気方位はいずれも逆帯磁を示す(Hosoi et al., 2015)。今回得られた年代値を考慮すると、大石層主部の逆帯磁期はクロン C5Bn. 2r に相当すると考えられ、その年代は 16.0–15.2 Ma(Hilgen et al., 2012)である。全ての年代データを踏まえると大石層はクロン C5Bn. 2r の下限年

Oishi Fm. Kawashiri Tuff Mb. **Oishi Fm. main part** **Oarasawa Fm.**

Fig. 4. Grain age histograms, age spectra, and radial plots for zircon ages determined by FT dating. Sample OI-t1 and OI-16 show more than one age group. Zircons of the youngest cluster (according to U-Pb dating) are shown as white circles, while the remaining data are shown as black circles.

代(16.0 Ma)より新しく、今回得られた大石層主部の上部の年代値(誤差を踏まえ 15.4 Ma)より古いことになる(Fig. 6).

大石層川尻凝灰岩部層は大石層主部を整合に被覆する。川尻凝灰岩部層上部の放射年代値(約 14–8.5 Ma)と流紋岩が逆帯磁であること(Hosoi et al., 2015), 上位の小繫沢層下部の FT 年代値(14.0 ± 1.1 Ma)より古いことを考慮すると、川尻凝灰岩部層の上部はクロン C5ABr または C5AAr のどちらかであると考えるのが妥当である。川尻凝灰岩部層上部の年代と矛盾するため今後の検討が必要だが、小繫沢層からは N10 帯の有孔虫化石が報告されているため(中嶋ほか, 2000), 本論では川尻凝灰岩部層上部の年代が古い方のクロン(C5ABr: 約 13.7–13.6 Ma)に相当すると考えた。川尻凝灰岩部層の年代は、大石層主部の年代(16.0–15.4 Ma の期間内)より新しく、13.6 Ma より古いと見積もることができる。この結果は、小繫沢層全体の石灰質ナノ化石が NN6 帯を示し、その NN6 帯の下限年代が 13.5 Ma (Anthonissen and Ogg, 2012)であることに調和的である。

本論では地層境界年代に誤差があるものの、大荒沢層を約

20–18 Ma の下部中新統、大石層主部を 16.0–15.4 Ma、大石層川尻凝灰岩部層を 15.4–13.6 Ma とした。

5. 堆積盆発達史

ここでは調査地域の堆積盆発達史(細井・天野, 2013)に詳細な年代軸を入れ、堆積盆発達史を論ずる。

調査地域は前期中新世に堆積盆を形成し、その後数百万年間の不整合を形成する期間が生じた可能性が考えられる。16 Ma 頃から堆積盆内では沈降が始まり、大石層主部の砂岩や泥岩を主とした堆積物が堆積した。大石層主部の環境は陸上から浅海帯～上部漸深海帯へと変化した。15.4 Ma 頃に活発な火成活動と調査地域の回転が始まるとともに、水深は中部漸深海帯へと変化した。堆積盆内では軽石凝灰岩を主とした川尻凝灰岩部層が堆積し、13.6 Ma 頃に流紋岩の溶岩ドームを形成した。川尻凝灰岩部層上部には黒鉱鉱床を胚胎しており、本地域の黒鉱胚胎は 13.6 Ma 頃であったことを示す。本地域と同じ東北日本脊梁地域に位置する秋田県北鹿周辺でも、同時期に同様の変遷を辿ったことが知られている(山田・吉田, 2002)。北鹿周辺では 17.5–15 Ma 頃に急速な沈降が起こり、15–13 Ma 頃に珪長質火山活動が起こっ

Oishi Fm. Kawashiri Tuff Mb.

Oishi Fm. main part

Oarasawa Fm.

■ U-Pb age of the youngest concordant zircon grains (error: 2σ) ◐ U-Pb age for each zircon grains (error: 2σ)
 ■ FT age (error: 2σ) ◐ FT age for each zircon grains (error: 2σ)

Fig. 5. Relationship between U-Pb and FT ages for the analyzed zircon grains of concordant U-Pb ages. The dark and light grey circles show the U-Pb and FT ages, respectively, with 2σ error bars. The shaded zones indicate 2σ error, as determined using the weighted mean U-Pb and FT ages for each sample. Dashed lines indicate boundaries between groups with similar concordant U-Pb ages.

た。この珪長質火山活動の末期には黒鉍鉍床が形成された(山田・吉田, 2002)。本研究結果は、東北日本弧中軸部のいわゆる黒鉍グラベン(Nakajima, 2013)では、中期中新世のほぼ同時期に同一のテクトニックセッティングであったことを示唆する。

年代測定結果に基づき、大石層から小繫沢層までの沈降量を求めた(Fig. 7)。沈降量の見積りは、ユースタティックな海水準変動や堆積物の圧密は考慮せず、また垂直方向に連続して堆積したと仮定し、古水深と堆積物の層厚から求めた。

古水深は底生有孔虫のデータに基づく。その結果、本地域の沈降運動は大石層主部堆積時が最大であり、上位の小繫沢層へ向かって減衰することが判明した。細井・天野(2013)やHosoi et al.(2015)は大石層川尻凝灰岩部層堆積時に沈降運動、調査地域の反時計回りの回転運動、爆発的な珪長質火山活動が同時に起こったことから、川尻凝灰岩部層堆積時からテクトニクスが変化したと考えた。しかし沈降運動は川尻凝灰岩部層堆積時より、むしろ大石層主部堆積時の方が活発である。また今回、大石層主部は下位の大荒沢層と不整合関係

Fig. 6. Chronostratigraphic and tectonic framework for the study area, including stratigraphic correlation with the Oga Peninsula. The geomagnetic polarity data are after Grandstein et al. (2012), the calcareous nannofossil zones are after Martini (1971), and the planktonic foraminiferal zones are after Blow (1969). ※ 1: Nakajima et al. (2000), ※ 2: Nakajima et al. (2006), ※ 3: Nakajima and Danhara (1999), ※ 4: Hosoi et al. (2015), ※ 5: Kano et al. (2011).

であり、時間間隙を空けた後に堆積し始めた地層であることが判明した。テクトニックな変化は川尻凝灰岩部層堆積時に始まったとするよりも、むしろ大石層主部堆積時に始まり、小繋沢層までが一連のテクトニクスであると考えられる。川

尻凝灰岩部層堆積時の火山活動と回転運動は、一連のテクトニクス内における一つのイベントであったと考え、堆積盆地内ではテクトニックな変化が大石層主部堆積時の 16.0 Ma 頃に始まり、15.4–13.6 Ma 頃の回転運動と火山活動を伴い、

小繫沢層の上部堆積時の 12 Ma 頃(Nakajima, 2013) へ向かって緩やかに収束した。その後、本地域は隆起に転じたと考えられる(Nakajima, 2013)。

6. 東北日本弧の前期～中期中新世テクトニクス

東北日本の前弧域や新潟県の羽越地域、加茂地域では、15 Ma 頃にリフティングを終えていた(Yamaji, 1990; 工藤ほか, 2011; Nakajima, 2013)のに対し、黒鉱グラベンでは、15 Ma 以降もリフティングが継続していた可能性が考えられる。これは、西黒沢層堆積時に活発な玄武岩火山活動が起こったいわゆる青沢グラベン(Nakajima, 2013)についても同様である(Sato, 1994)。Hoshi and Matsubara (1998)やHoshi and Takahashi(1999)によると、東北日本の主たる反時計回り運動の時期は21–17 Ma 頃である。また近年、Hoshi and Sano(2013)やHoshi et al.(2015)は放射年代測定や微化石年代に基づき、西南日本の時計回り運動の時期を17.5–15.8 Ma の間とした。日本海拡大に伴ったこれらの回転運動の時期は、黒鉱グラベンの急速な沈降運動開始の時期と一致し、この時期に黒鉱、青沢グラベンではリフティングが始まったと考えられる。青沢グラベン内の権現山層(約15–14 Ma)からは、僅かに西偏した古地磁気方位が得られており(Momose et al., 1990)、黒鉱グラベン内の本地域では大石層川尻凝灰岩部層堆積時(15.4–13.6 Ma)の反時計回りの回転運動が明らかになっている(Hosoi et al., 2015)。他の地域より遅くまでリフティングを継続していた黒鉱および青沢グラベンでは、リフティングに伴ってブロック回転運動が生じた可能性がある(山路, 2000)。

今回、新たに得た年代データをもとに再検討した層序は、グリーンタフの模式層序である男鹿半島で新しく修正された層序(鹿野ほか, 2011)と、地層の年代や不整合の時期がほぼ一致する。大荒沢層は台島層や野村川層に、大石層、小繫沢層は西黒沢層に相当し、前期中新世後期にオンラップ不整合が形成された(Fig. 6)。また、同様に近年改訂された阿仁合地域の層序(鹿野ほか, 2012a)ともほぼ一致する。これらは、従来認識されていなかった前期中新世の不整合が東北日本全域で形成された可能性を示す。現在広く受け入れられている日本海拡大前後のテクトニクスは、少なくともグリーンタフのデータについては年代から再検討する必要があることを意味する。日本海拡大の時期とその詳細についても議論の余地がある。黒鉱グラベンでは、西黒沢層相当の時期にブロック回転運動を伴ったリフティングが起こり、また背弧側地域の青沢グラベンでは西黒沢層相当の時期に多量の玄武岩が噴出した(例えば、出羽山地の青沢層や砂子淵層)。これらの玄武岩は化学組成、同位体組成から日本海拡大に伴ったアセノスフェアの上昇によるものと考えられており(Shuto et al., 1993; 八木ほか, 2001 など)、このことは西黒沢層相当層の末期(約13–12 Ma, 鹿野ほか, 2011)まで日本海拡大のテクトニクスが継続していた可能性を示唆する(Sato, 1994; 八木ほか, 2001; Nakajima, 2013)。一方、日本海拡大時に噴出した日本海の玄武岩の年代は21–15 Ma 頃であり(Kaneoka et al., 1992; Nohda, 2009)、日本海拡大に伴っ

Fig. 7. Total subsidence in the study area, as estimated using paleowater depth and formation thicknesses.

た回転運動の時期は、東北日本では21–17 Ma、西南日本では17.5–15.8 Ma の間である(Hoshi and Matsubara, 1998; Hoshi and Takahashi, 1999; Hoshi and Sano, 2013; Hoshi et al., 2015)。また、東北日本弧の前弧域や羽越地域、加茂地域では、15 Ma 頃にリフティングを終えていた(Yamaji, 1990; 工藤ほか, 2011; Nakajima, 2013)。これらのデータに基づけば、日本海拡大に伴ったリフティングの終了時期は地域によって異なっていたと考えられる。その他、Kano et al.(2007)や鹿野(2013)は、前期漸新世頃には既に日本海拡大が始まり、西黒沢層以降(17–16 Ma 以降)は日本海拡大後の異なるテクトニクスステージであると考えた。いずれにせよ、日本海拡大に関連したグリーンタフについては、精確な放射年代測定に基づき層序から全面的に見直す必要がある。

ま と め

1. 岩手県西和賀町に分布するグリーンタフ(下位から大荒沢層、大石層主部、大石層川尻凝灰岩部層)のFT および U-Pb ダブル年代測定を実施した。外来ジルコン結晶の混在と区別、FT 年代と U-Pb 年代の一致性、FT 年代の再加熱による若返りなどを考慮し、さらに他の年代情報と組み合わせ、各層の堆積年代を以下のように推定した。
大荒沢層：20–18 Ma,
大石層主部：16.0–15.4 Ma,
大石層川尻凝灰岩部層：15.4–13.6 Ma.
なお、大荒沢層と大石層間には少なくとも数百万年間の時間間隙が考えられ、両者は不整合である。大石層主部と大石層川尻凝灰岩部層、その上位の小繫沢層は整合な関係である。
2. 調査地域の沈降速度は大石層主部堆積時が最大であり、小繫沢層へ向かって穏やかに減少する。調査地域では16 Ma 頃の大石層堆積時からテクトニックな変化が始まり、

15.4–13.6 Ma 頃の大石層川尻凝灰岩部層堆積時の珪長質な火山活動と回転運動を伴って、13.6–12 Ma 頃の小繁沢層堆積時へ向かって穏やかに収束した。この地史は北鹿地域のグリーンタフと一致し、黒鉱グラーベンでは同時期に同様の変遷を辿った。青沢グラーベンや黒鉱グラーベンでは、東北日本弧の前弧域や羽越地域、加茂地域と異なり、15 Ma 以降もリフティングが継続し、一部ではリフティングに伴ったブロック回転が生じた可能性がある。

謝 辞

本研究は筆頭著者の博士課程在籍時の研究の一部である。在学中に茨城大学理学部理学科地質学・岩石鉱物学ゼミの教員の方々からは多くの助言を賜った。本原稿を査読して頂いた長谷部徳子氏(金沢大学)と匿名査読者、編集委員長の山路敦氏(京都大学)からは建設的なコメントを頂き、本稿の内容が改善された。担当編集委員の伊藤久敏氏(電力中央研究所)には編集の労を執って頂いた。以上の方々に深くお礼申し上げます。本研究には日本学術振興会特別研究員奨励費(14J04823)の一部を使用した。

文 献

- 秋葉 力・八島隆一・渡辺 順・吉谷昭彦・矢島淳吉(Akiba, C., Yoshima, R., Watanabe, J., Yoshitani, A. and Yajima, J.), 1966, 春後地域の初期グリーンタフ活動(Early Miocene green tuff activity along the National Railway Yokote-Kurosawajiri line over the backbone range of Northeast Japan). 地団研専報(Monog. Assoc. Geol. Collab. Japan), **12**, 25–34.
- Allen, S. R. and McPhie, J., 2009, Products of neptunian eruptions. *Geology*, **37**, 639–642.
- 天野一男・佐藤比呂志(Amano, K. and Sato, H.), 1989, 東北本州弧中部地域の新生代テクトニクス(Neogene tectonics of the central part of Northeast Honshu Arc). 地質学論集(Mem. Geol. Soc. Japan), **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.
- 安斎憲夫(Anzai, N.), 1989, 岩手県川尻地域の前期～中期中新世火山活動(予報)(Volcanic activity during early to middle Miocene in the Kawashiri district, Iwate Prefecture). 日本地質学会第96年学術大会講演要旨(96th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 198.
- 安斎憲夫・板谷徹丸(Anzai, N. and Itaya, T.), 1990, 岩手県川尻地域中新世火山岩類のK–Ar年代と岩石学的特徴(K–Ar age and petrology of the middle Miocene volcanic rocks in the Kawashiri district Iwate Prefecture). 日本地質学会第97年学術大会講演要旨(97th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 408.
- Blow, W. A., 1969, Late Middle Eocene to recent planktonic foraminiferal biostratigraphy. In Bronnimann, P. and Rentz, H. R., eds., *Proceedings of the First International Conference on Planktonic Microfossils*, Geneva, 1967, **1**, 199–422.
- 檀原 徹・星 博幸・岩野英樹・吉岡 哲・折橋裕二(Danhara, T., Hoshi, H., Iwano, H., Yoshioka, T. and Orihashi, Y.), 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(Fission track ages of welded tuffs of Gongenzaki Formation in the Tsugaru district, Aomori Prefecture, northeast Japan). 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **111**, 476–487.
- 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. *Isl. Arc*, **22**, 264–279.
- 藤田至則・垣見俊弘・沓沢 新・三梨 昂・水野篤行・佐藤二郎・山下昇(Fujita, Y., Kakimi, T., Kutsuzawa, A., Minashi, N., Mizuno, A., Sato, J. and Yamashita, N.), 1966, 春後地域の新第三紀における造構運動(Neogene tectonic movements in the Backbone Range of Northeast Japan). 地団研専報(Monog. Assoc. Geol. Collab. Japan), **12**, 42–58.
- Grandstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D. and Ogg, G. M., eds., 2012, *The Geologic Time Scale 2012*. Elsevier, Amsterdam, 2 Vols., 1144p.
- 早川典久・舟山裕士・斎藤邦三・北村 信(Hayakawa, N., Funayama, Y., Saito, K. and Kitamura, N.), 1954, 岩手県北上山地より春梁山地に亘る地域の新第三系の地質(Geology of the Neogene Tertiary between the western border of Kitakami mountainlands and Ou backbone ranges, Iwate Prefecture). 東北鉱山学会誌(Jour. Tohoku Min. Soc.), **10**, 1–97.
- 早坂康隆・大友幸子・西川 治(Hayasaka, Y., Ohtomo, Y. and Nishikawa, Y.), 2015, 東北春梁地域に点在する白亜紀花崗岩類のジルコンU–Pb年代(Zircon U–Pb ages of Cretaceous granites in the Tohoku Province, NE Japan). 日本地質学会第122年学術大会講演要旨(122nd Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 201.
- Hilgen, F. J., Lourens, L. J. and Van Dam, J. A., 2012, The Neogene Period. In Grandstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M. D. and Ogg, G. M., eds., *The Geologic Time Scale 2012*, Elsevier, Amsterdam, 923–978.
- Holden, N. E. and Hoffman, D. C., 2000, Spontaneous fission half-lives for ground-state nuclides (Technical report). *Pure Appl. Chem.*, **72**, 1525–1562.
- 星 博幸・岩野英樹・檀原 徹(Hoshi, H., Iwano, H. and Danhara, T.), 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(Age of the Isomatsu Formation in the Tsugaru Peninsula, northeastern Japan: zircon U–Pb dating of a Miocene green tuff bed). 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **122**, 163–170.
- Hoshi, H., Kato, D., Ando, Y. and Nakashima, K., 2015, Timing of clockwise rotation of Southwest Japan: constraints from new middle Miocene paleomagnetic results. *Earth Planets Space*, **67**, 92, doi: 10.1186/s40623-015-0266-3.
- Hoshi, H. and Matsubara, T., 1998, Early Miocene paleomagnetic results from the Ninohe area, NE Japan: Implications for arc rotation and intra-arc differential rotations. *Earth Planets Space*, **50**, 23–33.
- Hoshi, H. and Sano, M., 2013, Paleomagnetic constraints on Miocene rotation in the central Japan Arc. *Isl. Arc*, **22**, 197–213.
- Hoshi, H. and Takahashi, M., 1999, Miocene counterclockwise rotation of Northeast Japan: a review and new model. *Bull. Geol. Surv. Japan*, **50**, 3–16.
- 細井 淳・天野一男(Hosoi, J. and Amano, K.), 2013, 岩手県西和賀町周辺奥羽春梁山脈における前期～中期中新世の火山活動と堆積盆発達史(The Early to Middle Miocene volcanism and development of a sedimentary basin in the Ou Backbone Range in Nishiwaga Town, Iwate Prefecture, Northeast Japan). 地質雑(Jour. Geol. Soc. Japan), **119**, 630–646.
- Hosoi, J., Okada, M., Gokan, T., Amano, K. and Martin, A. J., 2015, Early to Middle Miocene rotational tectonics of the Ou Backbone Range, northeast Japan. *Isl. Arc*, **24**, 288–300.
- Hurford, A. J., 1990a, Standardization of fission track dating calibration: Recommendation by the Fission Track Working Group of the I.U.G.S. Subcommittee on Geochronology.

- Chem. Geol.*, **80**, 171–178.
- Hurfurd, A. J., 1990b, International union of geological sciences subcommission on geochronology recommendation for the standardization of fission track dating calibration and data reporting. *Int. Jour. Radiat. Appl. Instrum. Part D*, **17**, 233–236.
- Iizuka, T. and Hirata, T., 2004, Simultaneous determinations of U–Pb age and REE abundances for zircons using ArF excimer laser ablation-ICPMS. *Geochem. Jour.*, **38**, 229–241.
- 井尻正二 (Ijiri, S.), 1941, 本邦油田の地質構造の研究 (第 1 報), 横手・仙入峠間の第三紀層 (Study on the geologic structure of the Japanese oil-fields, on the Tertiary formation between Yokote and Sen-nin-toge). 石技誌 (*Jour. Japan. Assoc. Pet. Technol.*), **9**, 106–133.
- 岩野英樹・折橋裕二・檀原 徹・平田岳史・小笠原正雄 (Iwano, H., Orihashi, Y., Danhara, T., Hirata, T. and Ogasawara, M.), 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ー島根県川本花崗閃緑岩中の均質ジルコンを用いてー (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). 地質雑 (*Jour. 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 secondary U–Pb dating standard. *Isl. Arc*, **22**, 382–394.
- Kaneoka, I., Takigami, Y., Takaoka, N., Yamashita, S. and Tamaki, K., 1992, ^{40}Ar – ^{39}Ar analysis of volcanic rocks recovered from the Japan Sea floor: Constraints on the formation age of the Japan Sea. *Proc. ODP, Sci. Res.*, **127/128**, Pt. 2, 819–926.
- 鹿野和彦 (Kano, K.), 2013, 5 万分の 1 地質図幅「阿仁合 (第 2 版)」に見るグリーン・タフ研究の新たな展開 (New development in Green Tuff research: the 2nd edition of quadrangle map 1: 50,000, Aniai). *GSI 地質ニュース (GSJ Chishitsu News)*, **2**, 235–238.
- 鹿野和彦・小布施明子・佐藤雄大・大口健志・小笠原憲四郎 (Kano, K., Obuse, A., Sato, Y., Ohguchi, T. and Ogasawara, K.), 2008, 男鹿半島潮瀬ノ岬砂礫岩の年代層序学的位置づけ (Chronostratigraphic correlation of the Shiose-no-misaki Sandstone and Conglomerate, Oga Peninsula, NE Japan). 石技誌 (*Jour. Japan. Assoc. Pet. Technol.*), **73**, 86–96.
- 鹿野和彦・大口健志・石川洋平・矢内桂三・藤本幸雄・植村和彦・駒澤正夫 (Kano, K., Ohguchi, T., Ishikawa, Y., Yanai, K., Fujimoto, Y., Uemura, K., ... Komazawa, M.), 2012a, 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) (*Geology of the Aniai District, 2nd Edition. Quadrangle Series, 1: 50,000*). 産総研地質調査総合センター (Geol. Surv. Japan, AIST), 59p.
- 鹿野和彦・大口健志・植村和彦・小笠原憲四郎 (Kano, K., Ohguchi, T., Uemura, K. and Ogasawara, K.), 2013, 阿仁合植物群および打当植物群の年代とその地質学的意義 (Aniai and Utto floras: their ages and geologic implications). 日本地質学会第 120 年学術大会講演要旨 (*120th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.*), 61.
- 鹿野和彦・大口健志・柳沢幸夫・栗田泰夫・小林紀彦・佐藤雄太・駒澤正夫 (Kano, K., Ohguchi, T., Yanagisawa, Y., Awata, Y., Kobayashi, N., Sato, Y., ... Komazawa, M.), 2011, 戸賀および船川地域の地質 (第 2 版). 地域地質研究報告書 (5 万分の 1 地質図幅) (*Geology of the Toga and Funakawa District, 2nd Edition. Quadrangle Series, 1: 50,000*). 産総研地質調査総合センター (Geol. Surv. Japan, AIST), 127p.
- 鹿野和彦・谷 健一郎・岩野英樹・檀原 徹・石塚 治・大口健志・Dunkley, D. J. (Kano, K., Tani, K., Iwano, H., Danhara, T., Ishizuka, O., Ohguchi, T. and Dunkley, D. J.), 2012b, 東北日本男鹿半島, 赤島層の放射年代 (Radiometric ages of the Akashima Formation, Oga Peninsula, NE Japan). 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **118**, 351–364.
- Kano, K., Uto, K. and Ohguchi, T., 2007, Stratigraphic review of Eocene to Oligocene successions along the eastern Japan Sea: Implication for early opening of the Japan Sea. *Jour. Asian Earth Sci.*, **30**, 20–32.
- 鹿野和彦・柳沢幸夫 (Kano, K. and Yanagisawa, Y.), 1989, 阿仁合型植物群および台島型植物群の年代 (Ages of the Aniai-type and Daijima-type floras in Japan). 地調月報 (*Bull. Geol. Surv. Japan*), **40**, 647–653.
- Kato, N., Sato, H. and Umino, N., 2006, Fault reactivation and active tectonics on the fore-arc side of the back-arc rift system, NE Japan. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 2011–2022.
- 河野義礼・植田良夫 (Kawano, K. and Ueda, Y.), 1966, 本邦産火成岩の K–A dating (IV) – 東北日本の花崗岩類 – (K–A dating on the igneous rocks in Japan (IV) – Granitic rocks in north-eastern Japan –). 岩石鉱物鉱床学会誌 (*Jour. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*), **56**, 41–55.
- 金原啓司・吉村尚久・田村 貢・小林由起夫 (Kimbara, K., Yoshimura, T., Tamura, M. and Kobayashi, Y.), 1976, 東北脊梁地域における新第三系の変質 (Alteration of the Neogene Tertiary System in the backbone area of northeast Japan). 新潟大学理学部地質鉱物学教室研究報告 (*Contrib. Dept. Geol. Mineral. Niigata Univ.*), **4**, 437–444.
- 金属鉱物探鉱促進事業団 (Metal Mining Agency of Japan), 1971, 昭和 44 年度精密調査報告書「和賀雄物地域」 (*Close Survey Report of Waga-Omono Area in Fiscal 1969*) *. 金属鉱物探鉱促進事業団 (Metal Mining Agency of Japan), 91p.
- 金属鉱物探鉱促進事業団 (Metal Mining Agency of Japan), 1972, 昭和 45 年度精密調査報告書「和賀雄物地域」 (*Close Survey Report of Waga-Omono Area in Fiscal 1970*) *. 金属鉱物探鉱促進事業団 (Metal Mining Agency of Japan), 99p.
- 金属鉱物探鉱促進事業団 (Metal Mining Agency of Japan), 1973, 昭和 46 年度精密調査報告書「和賀雄物地域」 (*Close Survey Report of Waga-Omono Area in Fiscal 1971*) *. 金属鉱物探鉱促進事業団 (Metal Mining Agency of Japan), 124p.
- 金属鉱物探鉱促進事業団 (Metal Mining Agency of Japan), 1974, 昭和 47 年度精密調査報告書「和賀雄物地域」 (*Close Survey Report of Waga-Omono Area in Fiscal 1972*) *. 金属鉱物探鉱促進事業団 (Metal Mining Agency of Japan), 138p.
- 北村 信 (Kitamura, N.), 1959, 東北地方における第三紀造山運動について (Tertiary orogenesis in northeast Honshu, Japan). 東北大学地質古生物研報 (*Contrib. Inst. Geol. Paleontol., Tohoku Univ.*), **49**, 1–98.
- 北村 信 (Kitamura, N.), 1965, 5 万分の 1 地質図幅「焼石岳」および説明書 (*1: 50,000 Geological Map of Japan, Yakeishidake with Explanatory Text*). 地質調査所 (Geol. Surv. Japan), 48p.
- 北村 信編 (Kitamura, N. ed.), 1986, 新生代東北本州弧地質資料集 (全三巻) (*Cenozoic Arc Terrane of Northeast Honshu*) *. 宝文堂 (Hobundo).
- 北村 信・武藤 章 (Kitamura, N. and Muto, A.), 1962, 大荒沢層の積成機構にかんする問題 (Mechanism of accumulation of the Oarasawa Formation). 東北大学理学部地質学古生物学教室研究報告 (*Contrib. Inst. Geol. Paleontol. Tohoku Univ.*), **55**, 13+3p.
- 北村 信・谷 正巴 (Kitamura, N. and Tani, M.), 1953, 岩手県胆沢郡西部および西磐井郡西部の地質について (其の一) (Geology of the western parts of Isawa- and Nishi-Iwai-gun, Iwate Prefecture). 岩石鉱物鉱床学会誌 (*Jour. Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*), **37**, 103–116.
- 小林紀彦・鹿野和彦・大口健志 (Kobayashi, N., Kano, K. and Ohguchi, T.), 2004, 野村川層: 東北日本, 男鹿半島西部における新たな層序単位の提唱 (The Nomuragawa Formation: proposal for a new stratigraphic unit in the west Oga Peninsula, NE Japan). 石技誌 (*Jour. Japan. Assoc. Petrol. Technol.*), **69**, 374–384.
- 小林紀彦・大口健志・鹿野和彦 (Kobayashi, N., Ohguchi, T. and Kano, K.), 2008, 東北日本, 男鹿半島門前層層序の再検討. 地調研報 (*Bull. Geol. Surv. Japan*), **59**, 211–224.

- 後アルプス総合研究グループ編(Research Group for late Alpine orogeny* ed.), 1966, 東北日本のグリーンタフ変動(*Green-Tuff Movement in Northeast Japan*). 地団研専報(Monog. Assoc. Geol. Collab. Japan), **12**, 164p.
- 工藤 崇・柳沢幸夫・岩野英樹・檀原 徹(Kudo, T., Yanagisawa, Y., Iwano, H. and Danhara, T.), 2011, 新潟堆積盆地, 加茂地域における下部~中部中新統の年代層序と堆積盆発達史(Chronostratigraphy of the Lower to Middle Miocene successions and basin development in the Kamo area, Niigata Sedimentary Basin, northeast Japan Arc). 地学雑誌(*Jour. Geogr. (Chigaku Zasshi)*), **120**, 654–675.
- Lukács, R., Harangi, S., Bachmann, O., Guillon, M., Danisik, M., Buret, Y.,...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.
- Martini, E., 1971, Standard Tertiary and Quaternary calcareous nannoplankton zonation. In Farinacci, A., ed., *Planktonic Conference, Roma, 1970, Proceedings*, 2, Tencoscienza, Roma, 738–785.
- Maruyama, S., Hattori, K., Hirata, T., Suzuki, T. and Danhara, T., 2016, Simultaneous determination of 58 major and trace elements in volcanic glass shards from the INTAV sample mount using femtosecond laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geochem. Jour.*, **44**, 451–460.
- 松隈寿紀(Matsukuma, T.), 1969, 第三紀火山活動と鉱化作用, 特に土畑型網状鉱床を中心とする鉱床(Tertiary Volcanism and Mineralization especially about Tsuchithata-type Stockwork Deposits*). 日本鉱山地質学会日本岩石鉱物鉱床学会討論会資料(*Doc. Discuss. Soc. Mining Geol. Japan and Japan. Assoc. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*), 39–61.
- Meyer, C. and Hemley, J. J., 1967, Wall rock alteration. In Barnes, H. L., ed., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, Holt, Rinehart & Winston, Inc., New York, 166–235.
- Momose, H., Torii, M. and Tanaka, H., 1990, Counter-clockwise paleomagnetic direction from the Gongenyama Formation(N9–N10) on the coastal area of Northeast Japan. *Rock Magn. Paleogeophys.*, **17**, 47–50.
- 村山賢一(Murayama, K.), 1937, 7万5千分の1地質図幅「横手」および説明書(1: 75,000 Geological Map of Japan, Yokote with Explanatory Text). 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 165p.
- Nakajima, T., 2013, Late Cenozoic tectonic events and intra-arc basin development in Northeast Japan. In Itoh, Y., ed., *Mechanism of Sedimentary Basin Formation-Multidisciplinary Approach on Active Plate Margins*. InTech, Rijeka, 153–189.
- 中嶋 健・檀原 徹(Nakajima, T. and Danhara, T.), 1999, 岩手県湯田盆地に分布する中部中新統~鮮新統のフィッション・トラック年代(Fission-track ages of Middle Miocene to Pliocene tuffs and a lava from the Yuda Basin, Iwate Prefecture, Northeast Japan). 地質雑誌(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **105**, 668–671.
- 中嶋 健・檀原 徹・鎮西清高(Nakajima, T., Danhara, T. and Chinzei, K.), 2000, 岩手県湯田盆地の堆積盆発達史—新生代後期における奥羽脊梁中軸部の地質構造発達史に関連して—(Late Cenozoic basin development of the Yuda Basin in the axial part of the Ou Backbone Range, northeast Japan). 地質雑誌(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **106**, 93–111.
- Nakajima, T., Danhara, T., Iwano, H. and Chinzei, K., 2006, Uplift of the Ou Backbone Range in Northeast Japan at around 10 Ma and its implication for the tectonic evolution of the eastern margin of Asia. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **241**, 28–48.
- Nohda, S., 2009, Formation of the Japan Sea Basin: Reassessment from Ar-Ar ages and Nd-Sr isotopic data of basement basalts of the Japan Sea and adjacent regions. *Jour. Asian Earth Sci.*, **34**, 599–609.
- 大口健志・馬場 敬・佐藤時幸・田口一雄・高安泰助(Ohguchi, T., Baba, K., Sato, T., Taguchi, K. and Takayasu, T.), 1985, 奥羽脊梁最下部グリーンタフ, 大荒沢層の形成期(On the age of the Oarasa Formation, the lowest Green Tuff in the Ou Backbone Mountain Range, Northeast Japan). 石技誌(*Jour. Japan. Assoc. Pet. Technol.*), **50**, 30–37.
- 大沢 稔(Ozawa, A.), 1968, グリーン・タフ(*Green Tuff*)*. ラテイス(Rateisu)*, 231p.
- 大沢 稔・舟山裕士・北村 信(Ozawa, A., Funayama, Y. and Kitamura, N.), 1971, 川尻地域の地質. 地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)(*Geology of the Kawashiri Districts. Quadrangle Series, Scale 1: 50,000*), 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 45p.
- Saito, T., 1963, Miocene planktonic foraminifera from Honshu, Japan. *Sci. Rep. Tohoku Univ. 2nd Ser.*, **35**, 123–209.
- Sakata, S., Hattori, K., Iwano, H., Yokoyama, T. D., Danhara, T. and Hirata, T., 2014, Determination of U–Pb ages for young zircons using laser ablation-ICP-mass spectrometry coupled with an ion detection attenuator device. *Geostand. Geanal. Res.*, **38**, 409–420.
- 佐川栄次郎(Sakawa, E.), 1898, 20万分の1地質図幅「酒田」および同説明書(*Geology of the Sakata Districts. With Geological Sheet Map at 1: 200,000*). 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 61p.
- Sato, H., 1994, The relationship between late Cenozoic tectonic events and stress field and basin development in northeast Japan. *Jour. Geophys. Res.*, **99**, 22261–22274.
- Sato, H. and Amano, K., 1991, Relationship between tectonics, volcanism, sedimentation and basin development, Late Cenozoic, central part of Northern Honshu, Japan. *Sediment. Geol.*, **74**, 323–343.
- Sato, H., Hirata, N., Iwasaki, T., Matsubara, M. and Ikawa, T., 2002, Deep seismic reflection profiling across the Ou Backbone range, northern Honshu Island, Japan. *Tectonophysics*, **355**, 41–52.
- 佐藤比呂志・加藤直子(Sato, H. and Kato, N.), 2010, 北部本州背弧域の地殻構造と震源断層(Crustal structure and earthquake source faults on the backarc side of northern Honshu, Japan). 地質雑誌(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **116**, 592–601.
- 佐藤時幸・馬場 敬・大口健志・高山 俊(Sato, T., Baba, K., Ohguchi, T. and Takayama, Y.), 1991, 日本海側における海成下部中新統の発見と東北日本の台島期—西黒沢期における環境変動(Discovery of Early Miocene calcareous nannofossils from Japan Sea side, Northern Honshu, Japan, with reference to paleoenvironment in the Daijima and Nishikurosawa ages). 石技誌(*Jour. Japan. Assoc. Pet. Technol.*), **56**, 263–279.
- 島津光夫(Shimazu, M.), 1991, グリーンタフの岩石学(*Petrology of the Volcanic Rocks in the Green Tuff Region*). 共立出版(Kyoritsu Shuppan), 172p.
- Shuto, K., Ohki, J., Kagami, H., Yamamoto, M., Watanabe, N., Yamanoto, K.,...Itaya, T., 1993, The relationships between drastic changes in Sr isotope ratios of magma sources beneath the NE Japan arc and the spreading of the Japan Sea back-arc basin. *Mineral. Petrol.*, **49**, 71–90.
- 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.
- 鈴木達郎(Suzuki, T.), 1982, 東北地方の下部新第三系に関するfission track年代(Fission track ages of the lower Neogene in Northeast Japan)*. 日本地質学会第89年学術講演要旨集(89th Annu. Meet. Geol. Soc. Japan, Abstr.), 163.
- Tagami, T., Galbraith, R. F., Yamada, R. and Laslett, G. M., 1998, Revised annealing kinetics of fission tracks in zircon and geological implications. In Van den Haute, P. and De Corte, F., eds., *Advances in Fission-Track Geochronology*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 99–112.
- 玉生志郎(Tamanyu, S.), 1978, フィッション・トラック法による東

- 北日本第三系の年代測定—秋田県男鹿半島、石見三内地域、岩手県陸中川尻—焼石岳地域—(Fission track dating of the Tertiary rock samples from Northeast Japan-Oga Peninsula, Iwami-Sannai area in Akita Prefecture and Rikuchu-Kawashiri-Yakeishi-dake area in Iwate Prefecture-). 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **84**, 480–503.
- 白田雅郎・北村 信・岡本金一・大槻憲四郎 (Usuda, M., Kitamura, N., Okamoto, K. and Otsuki, K.), 1986, 島弧横断ルート No. 18(本庄—横手—川尻—北上) (Trans NE Japan Arc route no.18)*. 北村信編 (Kitamura, N. ed.) 新生代東北本州弧地質資料集, vol.2—その6—(Cenozoic Arc Terrane of Northeast Honshu, vol. 2, no. 6)*, 宝文堂 (Hobundo), 14p.
- 白田雅郎・岡本金一 (Usuda, M. and Okamoto, K.), 1986, 秋田県南部における新第三紀火山岩類の K-Ar 年代と新第三系の対比 (K-Ar ages of the Neogene volcanic rocks and correlation of the Neogene sequences in the southern part of Akita Prefecture). 北村信教授記念地質学論文集 (*Essays in Geology, Professor Nobu Kitamura Commemorative Volume*), 595–608.
- Vermeesch, P., 2017, Statistics for LA-ICP-MS based fission track dating. *Chem. Geol.*, **456**, 19–27.
- 脇田浩二・井川敏恵・宝田晋治 (編) (Wakita, K., Igawa, T. and Takarada, S., eds.), 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 (*Seamless Geological Map of Japan at a Scale of 200,000 DVD Edition, Digital Geoscience Map G-16*). 産業技術総合研究所地質調査総合センター (Geol. Surv. Japan, AIST).
- White, N. C. and Hedenquist, J. W., 1995, Epithermal gold deposits: Styles, characteristics and exploration. *SEG Newsl.*, **23**, 1–9.
- Wiedenbeck, M., Alle, 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.
- 八木正彦・長谷中利昭・大口健志・馬場 敬・佐藤比奈子・石山大三……吉田武義 (Yagi, M., Hasenaka, T., Ohguchi, T., Baba, K., Sato, H., Ishiyama, D.,...Yoshida, T.), 2001, リフト活動の変遷に伴うマグマ組成の変化—東北本州、前～中期中新世の秋田—山形堆積盆地における例— (Transition of magmatic composition reflecting an evolution of rifting activity—a case study of the Akita-Yamagata basin in Early to Middle Miocene, Northeast Honshu, Japan-). 岩石鉱物科学 (*Japan. Mag. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*), **30**, 265–287.
- 山田亮一・吉田武義 (Yamada, R. and Yoshida, T.), 2002, 北鹿とその周辺地域における新第三紀火山活動の変遷と黒鉱鉍床鉍化期との関連—火山岩活動年代の検討— (Relationships between the evolution of the Neogene volcanism and the Kuroko mineralization in the vicinity of the Hokuroku District, NE Japan—A chronological study-). 資源地質 (*Shigen-Chishitsu*), **52**, 97–110.
- Yamaji, A., 1990, Rapid intra-arc rifting in Miocene northeast Japan. *Tectonics*, **9**, 365–378.
- 山路 敦 (Yamaji, A.), 2000, 理論テクニクス入門: 構造地質学からのアプローチ (*Introduction to the Theories of Tectonics: Approach from Structural Geology*)*, 朝倉書店 (Asakura Publ.), 287p.
- Yokoyama, K., Shigeoka, M., Otomo, Y., Tokuno, K. and Tsutsumi, Y., 2016, Uraninite and thorite ages of around 400 granitoids in the Japanese Islands. *Mem. Natl. Mus. Nat. Sci., Tokyo*, **51**, 1–24.
- Yokoyama, T. D., Suzuki, T., Kon, Y. and Hirata, T., 2011, Determinations of rare earth element abundance and U-Pb age of zircons using multisport laser ablation-inductively coupled plasma mass spectrometry. *Anal. Chem.*, **83**, 8892–8899.
- 吉村尚久 (Yoshimura, T.), 2001, 粘土鉱物と変質作用 (*Clay Minerals and Alteration*)*. 地学双書 (Chigaku-Sosho), 32, 地学団体研究会 (Assoc. Geol. Collab. Japan). 293p.

*English translation from the original written in Japanese

以下の Table 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. Summary of zircon U-Pb data by LA-ICP-MS.

Table A2. Summary of zircon FT data.

(著者の貢献)

細井 淳 地質調査, 原稿執筆, 総括
中嶋 健 原稿執筆, 内容の議論と考察
檀原 徹 年代測定, 原稿執筆, データの考察
岩野英樹 年代測定, 原稿執筆, データの考察
平田岳史 年代測定機器の開発と調節
天野一男 地質調査

(要 旨)

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. (Hosoi, J., Nakajima, T., Danhara, T., Iwano, H., Hirata, T. and Amano, K., 2018, Zircon fission-track and U-Pb ages of the Green Tuff in Nishiwaga Town, Iwate Prefecture, and their implications. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **124**, 819–835.)

岩手県西和賀町周辺に分布するグリーンタフについて、ジルコン FT および U-Pb ダブル年代測定を実施し、本地域のグリーンタフ層序と堆積年代を再検討した。堆積年代は下位から順に、大荒沢層 (20–18 Ma)、大荒沢層を不整合に被覆する大石層主部 (16–15.4 Ma)、大石層上部に相当する川尻凝灰岩部層 (15.4–13.6 Ma)、大石層を整合に覆う小荒沢層 (13.6–12 Ma) と推定した。この結果は、近年改訂されたグリーンタフの模式層序の年代と調和的である。本調査地域は 16 Ma 頃にテクニクスが変化し、急速に沈降した。この変化は 15.4–13.6 Ma 頃に活発な珪長質火山活動と調査地域の回転運動を伴って、12 Ma 頃に収束した。