

手取層群赤岩亜層群北谷層砂岩の碎屑物供給源

Provenance analysis of the Kitadani Formation sandstones of the Akaiwa Subgroup, the Tetori Group

進士 優朱輝 (Yuzuki Shinji) *, 石坂 知裕 (Tomohiro Ishizaka) **, 辻森 樹 (Tatsuki Tsujimori) *,***

* 東北大学大学院理学研究科地学専攻 (Department of Earth Science, Tohoku University)

** 東北大学農学部生物生産科学科 (Department of Applied Bio-Sciences, Faculty of Agriculture, Tohoku University)

*** 東北大学東北アジア研究センター (Center for Northeast Asian Studies, Tohoku University)

Keywords: Tetori Group, Akaiawa Subgroup, Akaiwa Formation, Kitadani Formation, Detrital garnet

1. はじめに

堆積岩中に含まれる碎屑粒子の鉱物種とその量比は、その供給源となった後背地に分布していた地層や岩石を推定する上で重要である。碎屑粒子は後背地の地層や岩石の情報だけでなく、碎屑粒子が堆積岩となってから地表へ露出するまでに被った様々なテクトニックなプロセスの情報を読み解く鍵となる。地質学において、碎屑物を用いた堆積岩の後背地・堆積過程解析は古くから行われてきた。しかし、碎屑性鉱物は種類によって物理的・化学的性質がことなるため、運搬から堆積作用までの間に鉱物種と量比が大きく変化することもある。予想される不確定要素を排除したいという方向性と、1980年頃には電子プローブマイクロアナライザが普及したことによって、

堆積岩に砕屑粒子として含まれるざくろ石やクロムスピネルなど構造場の違いや原岩の特徴が推定可能な特定の造岩鉱物の化学組成に着目した後背地解析の研究がはじまった。国内では砕屑性ざくろ石(例えば、鈴木, 1977; 宮城ほか, 2013 など)や砕屑性クロムスピネル(例えば、荒井ほか, 1983; Hisada et al., 1997 など)を用いた後背地解析が岐阜県揖斐川町(旧揖斐川郡春日村)の春日層群や千葉県・房総半島の嶺岡帯などで行われてきた。また、北陸地方を主な分布域とする手取層群(中部ジュラ～下部白亜系)の砕屑岩においても砕屑性造岩鉱物を用いた後背地研究が行われてきた。例えば、大林(1995)は石川県南部・手取川上流域の白峰地域に分布する、手取層群上部の非海成層中の砂岩に含まれる砕屑性ざくろ石の化学組成傾向を示した。その結果、ざくろ石の大部分はグランダイト成分やスペッサルティン成分をごくわずかしかな含まないが、パイロープ成分を10～30モル%程度含むアルマンディンが主であり、泥質または砂質岩起源の変成岩由来であると考えた。また、パイロープ成分が高い砕屑性ざくろ石はグラニュライト相変成岩から供給された可能性を指摘した。山田ほか(2005)は、福井県大野市・石徹白地域などに分布する九頭竜亜層群、石川県・手取川流域と、福井県・石徹白川と九頭竜川流域に分布する石徹白亜層群、石徹白川と手取川流域に分布する赤岩亜層群の砂岩中の砕屑性ざくろ石の組成分析を予察的に報告した。彼らは砕屑性ざくろ石の化学組成傾向に砕屑性モナズ石のTh-Pb化学年代を組み合わせることで、少なくとも3種類の後背地を推定した。石徹白亜層群上部・赤岩亜層群の砂岩は古い年代値を示した砕屑性モナズ石とパイロープ成分に富む砕屑性ざくろ石の産出で特徴付けられ、石徹白亜層群下部の砂岩は若い年代値の砕屑性モナズ石とパイロープ成分の少ない砕屑性ざくろ石を多産する。一方、九頭竜亜層群の砂岩では若い年代の砕屑性モナズ石と一緒にパイロープ成分に富む砕屑性ざくろ石が

比較的多く産出する。なお、手取層群では碎屑性ざくろ石の研究だけでなく、変成岩礫に着目した研究も存在する。Tsuji-mori (1995)は福井県大野市・九頭竜川上流部に分布する石徹白亜層群山原礫岩層から、宇奈月変成岩類の中でも高変成度の変成岩に相当する十字石-珪線石片岩礫を見出し、山原礫岩層の堆積年代である後期ジュラ紀までには後背地として宇奈月変成岩類が露出していたとした。

上述のように多くの碎屑岩の後背地解析が先行研究に存在する。しかしながらその一方で、手取層群を特徴づける、白亜紀恐竜化石を多産する赤岩亜層群上部北谷層(例えば、Azuma & Currie, 2000 など)と、北谷層と近接して分布する赤岩亜層群赤岩層については、碎屑性造岩鉱物を用いた後背地解析や地層の対比は行われていない。アロサウルス上科に属すると考えられる肉食恐竜のフクイラプトル・キタダニエンスの発見(Azuma & Currie, 2002)に代表される恐竜化石の産出は、手取層群の堆積環境を特徴付ける重要な地質指標である。恐竜化石を胚胎する堆積岩にどのような造岩鉱物がどのような後背地から供給されていたか?本研究は福井県勝山市内に分布する手取層群赤岩亜層群上部・赤岩層と北谷層(下部白亜系)中の砂岩に含まれる碎屑性造岩鉱物について、鉱物分離と薄片試料から変成鉱物を探査した。とりわけ、北谷層中の砂岩に含まれる変成岩由来の碎屑粒子について記載し、恐竜が棲息していた堆積盆の後背地推定に取り組んだ。

2. 地質概要

北陸地方に広く分布する中部ジュラ～下部白亜系の手取層群は、堆積環境の違いに基づき3つの亜層群に区分される(例えば、前田, 1957; Fujita, 2003 など)。それぞれの亜相群は層序学的下位から、海成層を主体とする九頭竜亜層群(中部ジュラ～

下部白亜系)、汽水層主体の石徹白亜層群(下部白亜系)、淡水・汽水層(非海成層)からなる赤岩亜層群(下部白亜系)である。以下、本研対象地域である、福井県勝山市内の九頭竜川支流・滝波川流域の手取層群赤岩亜層群を中心に述べる。

滝波川流域では飛騨片麻岩類を基盤に層序学的下位から赤岩亜層群の赤岩層と北谷層が分布し、足羽層群の上部白亜系大道谷層と上部白亜系～古第三系面谷流紋岩類(中部地方に広く分布する濃飛流紋岩類と対比可能)に不整合で覆われる。さらに先白亜系の地層の一部は新第三系～第四系安山岩類にも不整合に被覆される(福井県, 2010)(図1)。

本地域を含む白山区(前田, 1961)に分布する手取層群には、数多くの層序学的・堆積学的な研究が存在するが(例えば、前田, 1958; Matsukawa et al., 2006; 酒井ほか, 2018 など)、いくつかの研究間では地層の区分や命名法に不一致がある。滝波川流域の手取層群は一部の研究(例えば、Matsukawa et al., 2006 など)を除き、赤岩亜層群に属する赤岩層と北谷層に区分されている。本報告書では滝波川流域における手取層群の層序を議論した酒井ほか(2018)に従う。

赤岩層は後述する北谷層の層序学的下位層であり、酒井ほか(2018)によれば、本地域は厚い中粒・粗粒砂岩層を主体とする。堆積年代は石川県白峰地域の赤岩層に挟まれる凝灰岩層中のジルコンU-Pb年代として約120Ma(松本ほか, 2006; 酒井ほか, 2015)が報告されている。

北谷層は本地域における手取層群最上位層に相当し、酒井ほか(2018)によればその下位の赤岩層と整合に接し、上位の大道谷層、面谷流紋岩類(濃飛流紋岩類)、新期安山岩類には不整合で覆われる。後述する、本研究で用いた試料(試料番号: KTY-2~11)の産地、勝山市北谷・恐竜化石発掘調査現場(柴田・後藤, 2008)が位置する杉山

川流域の北谷層は主に砂岩泥岩互層から構成される。砂岩泥岩互層には植物や二枚貝などの化石が含まれる。堆積年代は、化石による対比から、前期白亜紀アプチアン期と考えられている(Sano & Yabe, 2017)。

3. 研究手法

3-1. 試料採取

本研究では、勝山市内の赤岩層分布域において計3か所、北谷層については恐竜化石発掘調査現場(1か所)で採取した粗粒～極粗粒砂岩(または粗粒砂を含む泥岩)計15試料を用いた(図1、表1)。赤岩層の試料採取に当たっては、酒井ほか(2018)で示された赤岩層の分布域において、露頭または岩体から採取を行っている(図1)。また、北谷層の試料採取においては、恐竜化石発掘調査現場の露頭の堆積相を解析したSuzuki et al. (2015)を基に、堆積相・層準を野外で区別して試料採取した(図2、表1)。試料は大まかな層準や堆積相、岩相を基にして5グループに分類した(試料記載の項目を参照)。

3-2. 偏光顕微鏡観察および重鉍物化学組成分析

採取した15試料全てについて岩石研磨薄片を作成し、偏光顕微鏡による砂岩の構成成分のモード組成の決定と、構成粒子の粒度による堆積岩分類などの堆積岩としての記載を行った。その結果を踏まえ、採取地点の違い及び、層序学的な上下関係に基づいて各グループの試料からそれぞれ数試料ずつ代表的な試料を選定し、重鉍物分離と重鉍物の化学組成分析を行った。

試料は安井器械製マルチロックプレーシャーを用いて圧碎し、砕いた試料からニチ

カ社製ナイロンメッシュふるいを用いて 150~100 メッシュ (120~200 μm) の粉末を得た。その粉末中からネオジム磁石を用いて磁性を持つ(鉄を含む) 造岩鉱物を分離した。分離した鉱物は、ストルアス社 Specifix-40 エポキシ樹脂に包埋し、表面研磨した 1 インチ径円形樹脂マウント試料とし、FE-SEM-EDS システム(東北大学理学研究科地学専攻設置の日本電子社製 JSM-7001F 電界放出型走査型電子顕微鏡+オックスフォード・インストゥルメンツ社製エネルギー分散型エックス線検出装置 INCA X-Act システム)を用いて主要元素の化学組成分析を行った。一部の試料については岩石薄片上でも重鉱物の化学組成分析を行った。

4. 結果

4-1. 偏光顕微鏡観察

本研究で用いた全ての砂岩試料の構成成分モード組成、および記載岩石学的特徴を表 2 に示した。主要な構成鉱物は、石英・カリ長石・斜長石・炭酸塩鉱物(セメント)であった。碎屑粒子の円磨度は、ほとんどの試料で angular~subangular と円磨度が比較的低いものが卓越する。概して、石英は全ての試料においてそのほとんどが波動消光を示し、単一結晶石英の存在比が多結晶石英より大きい。カリ長石は、斜長石よりも存在比が大きい試料が大半をしめる。

以下、5つのグループのそれぞれにおける堆積岩記載上の特徴について述べていく。

グループ 1: 赤岩層砂岩 (KTY-1、13~16)

このグループ 1 の砂岩は一般に薄い灰色を呈し、粗粒~極粗粒砂岩に分類される。岡田(1971)による砂岩の分類では長石質アレナイトに区分される(図 3-a~c)。淘汰

は変質により細粒化した基質部が比較的多い試料(KTY-15・16)が存在するため一様でない。炭酸塩岩のセメントがモード比で数%見られ、重鉱物はたいていがモード比で1%程度である。薄片上でざくろ石や電気石、黒雲母の存在は確認されなかった。

採取地点によっては黒色泥岩の岩片が含まれていた(KTY-13・14)(図3-a)。KTY-15については全試料中でも全体に占める重鉱物のモード比が最も高かった(4%程度)。

グループ2:北谷層 S-12 砂岩層 (KTY-2)

本グループは灰色を呈し、その粒度から粗粒砂岩に分類される。変質によって細粒化した基質部が多いため、見かけの淘汰は悪く、長石質ワッケに分類される(図3-d~f)。炭酸塩岩のセメントがモード比で8%程度見られた(図3-d、e)。重鉱物はモード比で1%程度で、ざくろ石・電気石・黒雲母・白雲母などが含まれる。1mm程度の白雲母片と黒い炭質物片が層状に濃集している部分が見られた。層準は異なるが、後述のグループ3と共通する特徴が多い。

グループ3:北谷層 CMS 相中の S-11 砂岩層 (KTY-3~5、11)

グループ3は灰色を呈し、長石質アレナイトの粗粒~極粗粒砂岩である(図4-a~c)。様々な大きさ(3mm~3cm)の灰色泥岩の岩片が全ての試料にモード比で数%含まれる(図4-a)。基質部が全体の数%と少ないため淘汰がよく、KTY-5、11については砂の粒径も粗粒砂によくそろっているため淘汰が非常によい(図4-b、c)。炭酸塩岩のセメントがモード比で10%程度(またはそれ以上)占める(図4-b)。重鉱物はモード比で1%程度で、不透明鉱物が最も多く、ざくろ石・白雲母・緑泥石がすべてに共通して存在していた。4試料中ジルコンは3試料に、電気石は2試料と比較的多くの試料に含まれている(図4-b)。

グループ4:北谷層 SMS 相(泥岩)中の粗粒砂濃集部 (KTY-6、7、9、10)

本グループは、泥質の基質部がモード比で80%程度に達し、KTY-9(泥岩)を除いて粗粒砂岩に分類される(図4-d~f)。泥質基質の影響で見かけは黒い(図4-d)。淘汰は基質部が30%程度以上あるものが多く、悪い傾向にある。炭酸塩岩のセメントは見られなかった。重鉱物はモード比で1%程度で、ざくろ石・電気石・黒雲母・白雲母・緑泥石がすべてに共通して存在していた。KTY-7は周囲の泥の基質とは色や粒度が異なる泥岩の岩片を含んでいた(図4-e、f)。KTY-7、10に関しては貝化石、植物化石、炭質物が見られた。

グループ5:北谷層 SMS 相中の極粗粒砂岩 (KTY-8)

グループ5は緑がかった濃い灰色を呈し、最大2cm程度に達する黒い泥岩の礫をモード比で30%程度含む極粗粒砂岩である(図5-a)。礫をモード比で30%程度含むため淘汰の悪い石質アレナイトに分類される(図5)。炭酸塩岩のセメントがモード比で17%程度見られ、炭酸塩鉱物の脈が発達する(図5-b)。他のグループに比べて、重鉱物に富み、モード比で3%程度に達する(図5-b~g)。重鉱物は主として、ざくろ石・電気石・ジルコンである。電気石には組成累帯構造を示すものが観察された(図5-b、c)。また、ざくろ石の粒径は採取試料中で最も粗粒であった(図5-d、e)。一部の試料では炭質物に富む黒い薄層が存在した。

4-2. 重鉱物化学組成分析

偏光顕微鏡を用いた観察結果を踏まえ、採取地点の違いやより詳細な層序学的上下関係に基づき、グループ1は全ての試料、グループ2は全試料(KTY-2のみ)、グループ3はKTY-3・11、グループ4はKTY-7・10、グループ5は全試料(KTY-8のみ)について磁性を持つ(鉄に富む)重鉱物分離を行った。その結果、主要元素化学組成により

構造場の違いや原岩の特徴を推定可能な造岩鉱物としては、北谷層中の砂岩であるグループ 2~5 からのみ碎屑性電気石と碎屑性ざくろ石が得られた。以下ではそれぞれについての主要元素化学組成分析結果を述べる。

碎屑性電気石

碎屑性電気石については、KTY-3(グループ 3)で 1 個・1 点、KTY-8(グループ 5)で 3 個・計 45 点(KTY-8-1 : 1 点、KTY-8-2 : 18 点、KTY-8-3 : 26 点)の主要元素化学組成分析を行った。分析結果の代表値を表 3 に示した。KTY-3、KTY-8-1(図 6-a)については、Henry et al. (2011)の分類(ただし、W サイトに含まれる元素による分類は行っていない)に基づくと苦土電気石に分類された。ただ、KTY-3、KTY-8-1 共に $Fe/(Fe+Mg)$ の値が 0.421、0.452 と鉄電気石成分を多く固溶している、鉄電気石との中間組成に近い苦土電気石である。KTY-8-2 については測定した 18 点すべての組成は鉄電気石に分類された。 $Fe/(Fe+Mg)$ の値の範囲は 0.645~0.797、平均値は 0.768($\pm 1\sigma$: 0.044)であり、かつ電子顕微鏡の組成像観察でも顕著な組成累帯構造が見られなかったため(図 6-b)、碎屑粒子の大きさのスケールにおいて化学組成的にはほぼ均質であるといえる。KTY-8-3 は図 5-b・c で示した、偏光顕微鏡観察でも顕著な累帯構造を示した電気石であり、電子顕微鏡の組成像観察でも顕著な組成累帯構造が観察された(図 6-c)。主要元素化学組成の傾向としては組成像においてコア付近の明るい部分は $Fe/(Fe+Mg)$ の値が高く、リムに向かって暗くなるにつれて $Fe/(Fe+Mg)$ の値が徐々に低くなる傾向がある。 $Fe/(Fe+Mg)$ の値の範囲は最大値がコア付近で 0.710、最小値がリム付近で 0.478 であった。電気石の分類としてはコア付近が鉄電気石で、リムに向かって徐々に苦土電気石成分が固溶して増えていき、リムの最縁部付近が鉄電気石成分を多く固溶する、鉄電気石との中間組成に近い苦土電気石に分類

される。

砕屑性ざくろ石

砕屑性ざくろ石については、グループ 2 は KTY-2、グループ 3 は KTY-3・11、グループ 4 は KTY-7、グループ 5 は KTY-8 からそれぞれ分離した砕屑性ざくろ石の主要元素化学組成分析を行った。本研究で得られた砕屑性ざくろ石は、顕著な組成累帯構造を持たないため、砕屑粒子の大きさのスケールで化学組成はほぼ均質であるといえる。表 4 に各試料の砕屑性ざくろ石の代表的な主要元素化学組成値を、図 7 に各試料の砕屑性ざくろ石の組成値をパイロープ(Pyr)成分-スペッサルティン(Sps)成分-アルマンディン(Alm)成分とパイロープ(Pyr)成分-グロッシュラー(Grs)成分-アルマンディン(Alm)成分+スペッサルティン(Sps)成分のそれぞれ三成分系で表した三角プロットを示した。三角プロットの成分比は全てモル比である。図 7 の Pyr-Grs-(Alm+Sps)成分三角プロットによると、どの試料においても Grs 成分が 10 モル%以下のものが大半であった。しかし、図 7 の Pyr-Sps-Alm 成分三角プロットを見ると、化学組成の傾向は全試料に共通しておおよそ 2 つの組成グループが識別できる。1 つ目は Pyr-Alm グループである。このグループは Pyr-Alm 成分の辺付近にプロットされる、Sps 成分に乏しく(数モル%)、Pyr 成分をおよそ 10~40 モル%含むアルマンディンである。図 7 の Pyr-Sps-Alm 成分三角プロットから、このグループが占める割合がどの試料においても最も高いといえる。

2 つ目は Sps-Alm グループである。このグループは Sps-Alm 成分の辺付近にプロットされる、Pyr 成分に乏しく(数モル%)、Sps 成分を約 10~60 モル%含むアルマンディンといえる。ただし、KTY-2 のように Sps 成分が約 10~20 モル%の組成を持つざくろ石がほとんどの試料や、対照的に KTY-3・8 のように Sps 成分が約 40 モル%以

下の組成を持つざくろ石の割合が極端に少ない試料があり、試料間において組成範囲に大きな違いが見られる点はPyr-Almグループと異なる(図7)。

以下では各試料のPyr・Alm・Sps・Grs成分の組成幅と平均値を示す。

KTY-2(グループ2)

Pyr成分は3.3~41.1モル%(平均値20.5モル%)、Alm成分は54.2~81.0モル%(平均値72.0モル%)、Sps成分は0.3~15.5モル%(平均値2.7モル%)、Grs成分は2.1~19.9モル%(平均値は4.9モル%)である。Sps成分の最大値が砕屑性ざくろ石を含む試料中で最小である。また、Grs成分の組成幅が砕屑性ざくろ石を含む試料中で最大である。

KTY-3(グループ3)

Pyr成分は0.4~38.0モル%(平均値20.4モル%)、Alm成分は32.3~87.2モル%(平均値69.3モル%)、Sps成分は0.7~62.1モル%(平均値6.4モル%)、Grs成分は0.7~11.4モル%(平均値は4.0モル%)である。

KTY-11(グループ3)

Pyr成分は1.0~36.0モル%(平均値21.6モル%)、Alm成分は33.0~80.0モル%(平均値69.0モル%)、Sps成分は0.2~61.7モル%(平均値5.7モル%)、Grs成分は0.3~10.7モル%(平均値は3.8モル%)である。

KTY-7(グループ4)

Pyr成分は1.5~42.0モル%(平均値17.5モル%)、Alm成分は33.0~85.0モル%(平均値67.2モル%)、Sps成分は0.6~61.2モル%(平均値11.1モル%)、Grs成分は0.4~14.4モル%(平均値は4.2モル%)である。Sps成分の平均値が砕屑性ざくろ石を含む試料中で最大である。

KTY-8(グループ5)

Pyr 成分は 2.3~36.8 モル%(平均値 19.8 モル%)、Alm 成分は 33.0~84.0 モル%(平均値 67.2 モル%)、Sps 成分は 0.7~62.0 モル%(平均値 9.0 モル%)、Grs 成分は 0.4~9.7 モル%(平均値は 4.0 モル%)である。

5. 考察:手取層群赤岩亜層群北谷層砂岩の後背地について

5-1. 先行研究(大林, 1995)との碎屑性ざくろ石の比較:類似点

図 8 に大林(1995)による石川県南部・手取川上流域の白峰地域における手取層群赤岩亜層群赤岩層および明谷層(滝波川流域における北谷層相当)中の砂岩に含まれる碎屑性ざくろ石の化学組成を、パイロープ(Py)成分-スペッサルティン(Sp)成分-アルマンディン(Alm)成分とパイロープ(Py)成分-グランダイト(Gra)成分-アルマンディン(Alm)成分+スペッサルティン(Sp)成分のそれぞれ三成分系で表した化学組成三角プロットを本研究との比較のため示した。まず、本研究による Ca を含むざくろ石である Grs 成分(図 8 では Gra 成分として計算している)がおおよそ 10 モル%以下のものが大半であるという特徴は、大林(1995)が「グランダイト成分に富むざくろ石は各層ともごく少量で、赤岩層では全くないといつてよいほど少ない」と述べていることから一致する。また、図 7 の Pyr-Sps-Alm 成分三角プロットにおいて、Pyr 成分をおおよそ 20~40 モル%含むアルマンディンである Pyr-Alm グループが占める割合がどの試料においても最も高いといえるという特徴も、図 8 における Py-Sp-Alm 成分三角プロットや、大林(1995)が「Sp-Alm-Py ダイアグラム上では Alm-Py の辺に沿った領域にプロットされるものが多い。パイロープ成分は最大で約 40 モル%に達する」と述べていることとも矛盾しない。

以上を踏まえると、本研究で化学組成分析を行った北谷層中の碎屑性ざくろ石の起源となった岩石には、大林(1995)が白峰地域に分布する赤岩層・明谷層(北谷層相当)中の Pyr 成分を数 10 モル%含むアルマンディンの起源として示した、泥質または砂質岩起源の変成岩、さらに特にパイロープ成分が高い碎屑性ざくろ石の場合はグラニユライト相変成岩と類似した岩石が含まれている公算が高い。

5-2. 先行研究(大林, 1995)との碎屑性ざくろ石の比較:相違点

本研究における Sps 成分を約 10~60 モル%含むアルマンディンである Sps-Alm グループの存在も、「スペッサルティン成分に富むざくろ石が、全体の 20~30%程度の割合で含まれるものが存在する。これらのざくろ石群はほとんどアルマンディンとスペッサルティンのみからなり、スペッサルティンの含有量は 20~70 モル%の間に散らばる」という大林(1995)の記載・組成プロットによい一致を示す。ただし、大林(1995)は Sps 成分に富むアルマンディンは、しばしば自形結晶としての形態を残しているという観察事実も加味して、それらの碎屑性ざくろ石はペグマタイトや酸性火山岩の空隙起源であるという可能性を提唱している。本研究で得られた碎屑性ざくろ石においては、明瞭に自形結晶としての形態を残しているものを見いだせていないため、本研究で得られた Sps-Alm グループの碎屑性ざくろ石の起源については議論の余地がある。

また、大林(1995)は白峰地域に分布する赤岩層からも碎屑性ざくろ石を見出しているが、本研究で用いた滝波川流域の赤岩層中の砂岩試料(グループ 1)からは見いだせなかった。本研究では重鉍物の分離にネオジウム磁石を用いているため、磁性を持つ、鉄に富む重鉍物しか得られない。しかしながら、大林(1995)によると白峰地域に分布

する赤岩層中には、主に、本研究で北谷層試料からも得られた鉄に富むアルマンディンざくろ石と同等のざくろ石が含まれている。もし、滝波川流域の赤岩層が白峰地域に分布する赤岩層と類似した後背地を持つとすれば、滝波川流域の赤岩層試料から碎屑性ざくろ石を見出すことが可能であろう。つまり、滝波川流域の赤岩層の後背地と白峰地域に分布する赤岩層の後背地は異なる環境であった可能性が高い。さらに言えば、滝波川流域の赤岩層と北谷層は整合で接する(酒井ほか, 2018)ことから、同一堆積盆内において赤岩層堆積時と北谷層堆積時では異なる環境の後背地から碎屑物が供給されていた可能性が高いといえる。

5-3. 碎屑性電気石について

本研究で見出された碎屑性電気石は主要元素化学組成から、鉄電気石～鉄電気石成分を多く含む苦土電気石に分類された。 $Fe/(Fe+Mg)$ 原子比はおよそ0.4以上であった。Deer et al. (2013)によると、花崗岩や花崗岩ペグマタイト中には本研究で見出された鉄電気石よりもさらに鉄に富む鉄電気石や、リチウムに富み、鉄電気石との固溶体をなすリチア電気石が産出し、変成岩中には苦土電気石が産出する傾向があるとされている。このことを踏まえると、本研究で分析を行ったような中間的組成を持つ電気石の化学組成傾向から、その母岩であった岩石を推定することは困難である。しかしながら、例えば、Dutrow & Henry (2018)はWサイトに入るアニオン種類・量の特定や、ある種の電気石の組成累帯構造における元素置換の鉱物学的特徴から電気石の形成に関与した流体を推定しており、場合によっては電気石に限らずとも中間組成を持つ碎屑性鉱物からその鉱物の形成環境、ひいては後背地を推定できる可能性があるかもしれない。

5-4. 恐竜化石を胚胎する堆積岩の後背地

恐竜化石を胚胎する堆積岩にどのような造岩鉱物がどのような後背地から供給されていたか？

本研究では恐竜化石を胚胎する北谷層・恐竜化石発掘調査現場にて採取した、化石胚胎層とほぼ同時期に堆積したと考えられる粗粒砂岩・泥岩中の砂礫濃集部分から碎屑性ざくろ石を見出した。その化学組成は、直線距離でおよそ10km離れた、いくつかの谷や尾根を越えた先の手取川流域に分布する同時代の砂岩中に含まれる碎屑性ざくろ石のものと一定の範囲で一致した。このことは必ずしも北谷層の後背地が手取川流域の砂岩と共通であったことを示すものではないが、手取川流域での先行研究により提唱された泥質・砂質岩起源の変成岩やグラニュライト相変成岩と類似した岩石が勝山に恐竜が繁栄していた前期白亜紀にはすでに堆積盆の後背地に広域に露出していた可能性が高い。しかしながら、北谷層堆積の直前に堆積した赤岩層は少なくとも鉄に富む碎屑性ざくろ石を含まないことから、手取川流域・北谷層とはやや異なった後背地環境の存在と、北谷層の堆積環境時期に何らかの後背地環境（後背地に露出する岩石や碎屑物の供給機構など）の変化が起きたことが示唆される。この後背地環境の変化は北谷層に特徴的に恐竜化石が多産することに関連があるのかもしれない。このような何らかの地質学的イベントとの関連を解き明かすためには今後、碎屑性ジルコン年代学の併用が欠かせない。しかしながら、従来のようなルーチンで年代測定するだけでなく、ジルコンのサイズや形状ごとに統計的なデータ収集に加え、ハフニウム同位体比・酸素同位体比・微量元素組成の付加が欠かせない。同様に、重鉱物についても、単に化学組成傾向を調べるだけでなく、サイズに基づいたデータが必要となる。いずれにせよ、データ駆動型の統計処理ができるよう多角的な砂岩中の碎屑物の

データベースを構築していくことで、恐竜化石を胚胎する地層の堆積盆及び後背地に関して新しい視点をもたらすであろう。

6. 謝辞

本研究において、恐竜化石発掘調査現場での試料採取の際に我々に同行していただき、堆積相の詳細な判別に多大なるご協力を頂いた福井県立恐竜博物館の湯川弘一主事に厚く御礼申し上げます。また、我々の恐竜化石発掘調査現場での試料採取許可申請を快諾していただきました、福井県立恐竜博物館・竹内 利寿館長と、許可申請の際に我々との窓口役を引き受けていただきました、福井県立恐竜博物館・静谷あてな主事に深い感謝の意を表します。最後に、平成 30 年度勝山市ジオパーク学術研究等奨励補助金を使用して本研究を進めるにあたり、補助金申請から実績報告書類提出に至るまで、事務的手続きへの対応や勝山市内での調査における助言といった実務面でのご支援を多々賜りました、勝山市商工観光部ジオパークまちづくり課・町 澄秋様に心より御礼申し上げます。

7. 引用文献

- 荒井章司・伊藤谷生・小沢一仁 (1983) 嶺岡帯に産する超塩基性・塩基性碎屑岩類について: 地質学雑誌, 89, 287-297.
- Azuma, Y. and Currie, P. J. (2000) A new carnosaur (Dinosauria: Theropoda) from the Lower Cretaceous of Japan: Canadian Journal of Earth Sciences 37, 1735-1753.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (2013). An introduction to the

rock forming minerals. - 3rd edition: The mineralogical society London, pp. 498.

Dutrow, B., L. and Henry, D., J. (2018) Tourmaline compositions and textures: reflections of the fluid phase: *Journal of Geosciences*, 63, 99-110.

Fujita. M. (2003) Geological age and correlation of the vertebrate-bearing horizons in the Tetori group: *Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum*, 2, 3-14.

福井県 (2010) 福井県地質図及び同説明書 (2010年版) : (財) 福井県建設技術公社, 173p.

後藤道治 (2010) 福井県勝山市の手取層群北谷層 (下部白亜系) から産出したヒラマキガイ科の腹足類化石: *福井県立恐竜博物館紀要*, 9, 41-45.

Henry, D. J., Novák, M., Hawthorne, F. C., Ertl, A., Dutrow, B. L., Uher, P., and Pezzotta, F. (2011) Nomenclature of the tourmaline-supergroup minerals: *American Mineralogist*, 96, 895-913.

Hisada, K., Aihara. K. and Arai, S. (1997) Significance of detrital chromian spinels from the Cretaceous Atokura Formation, Kanto Mountains, central Japan: *The Memoirs of the Geological Society of Japan*, 48, 85-91.

前田四郎 (1957) 福井県打波川および石徹白川流域の手取層群の層序と構造: *地質学雑誌*, 63, 357-365

前田四郎 (1958) 白山地域の手取層群の層序と構造(その1 層序): *地質学雑誌*, 64, 583-594.

- 前田四郎(1961) 手取層群の地史学的研究: 千葉大学文理学部紀要, 3, 369-426.
- Matsukawa, M., Ito, M., Nishida, N., Koarai, K., Lockley, M. G. and Nichols, D. J. (2006) The Cretaceous Tetori biota in Japan and its evolutionary significance for terrestrial ecosystems in Asia: *Cretaceous Research*, 27, 199-225.
- 松本藍・楠橋直・村上雅紀・田上高広・平田岳史・飯塚毅・半田岳士・松岡廣繁 (2006) LA-ICPMS を用いた手取層群の凝灰岩層のジルコン・ウラン鉛年代: 日本古生物学会第 155 回例会予稿集, 110.
- 宮城直樹・馬場壮太郎・新城竜一 (2013) 沖縄島および周辺諸島に分布する先新第三系基盤岩類の全岩化学組成と碎屑性ザクロ石化学組成: *地質学雑誌*, 119, 665-678.
- 大林達生 (1995) 碎屑性ザクロ石の化学組成からみた石川県白峰地域の手取層群の後背地: *地質学雑誌*, 101, 235-248.
- 岡田博有 (1971) 再び砂岩の分類と命名について: *地質学雑誌*, 77, 395-396.
- 酒井佑輔・園田哲平・堤之恭・楠橋直・堀江憲路・松岡篤 (2015) 石川県白峰地域における手取層群赤岩亜層群の凝灰岩から得られたジルコンの U-Pb 年代: 日本古生物学会 2015 年年会予稿集, 49.
- 酒井祐輔・関戸信次・松岡篤 (2018) 石川-福井県境地域における下部白亜系手取層群の層序と植物化石群の層位学的意義: *地質学雑誌*, 124, 171-189.
- Sano, S. and Yabe, A. (2017) Fauna and flora of Early Cretaceous Tetori Group in Central Japan: The clues to revealing the evolution of Cretaceous terrestrial ecosystem in East Asia: *Palaeoworld*, 26, 253-

267.

柴田正輝・後藤道治（2008）福井県勝山市における第三次恐竜化石発掘調査報告

（2007年度）：福井県立恐竜博物館紀要，7，109-116.

鈴木和博（1977）岐阜県揖斐郡春日村の古生層砂岩中の碎屑性高パイロップざくろ

石：日本地質学会第84年学術大会講演要旨，17.

Suzuki, S., Shibata, M., Azuma, Y., Yukawa, Y., Sekiya, T. and Masaoka, Y.

(2015) Sedimentary environment of dinosaur fossil bearing successions

of the Lower Cretaceous Kitadani Formation, Tetori group, Katsuyama

City, Fukui, Japan: Memoir of the Fukui Prefectural Dinosaur Museum,

14, 1-9.

山田敏弘・横山一己・櫛座圭太郎（2005）砂岩中の碎屑性粒子の化学的特性に基づく

足羽川地域の手取層群の層序対比：日本地質学会第112年学術大会講演要旨，

P-40.

図一覽

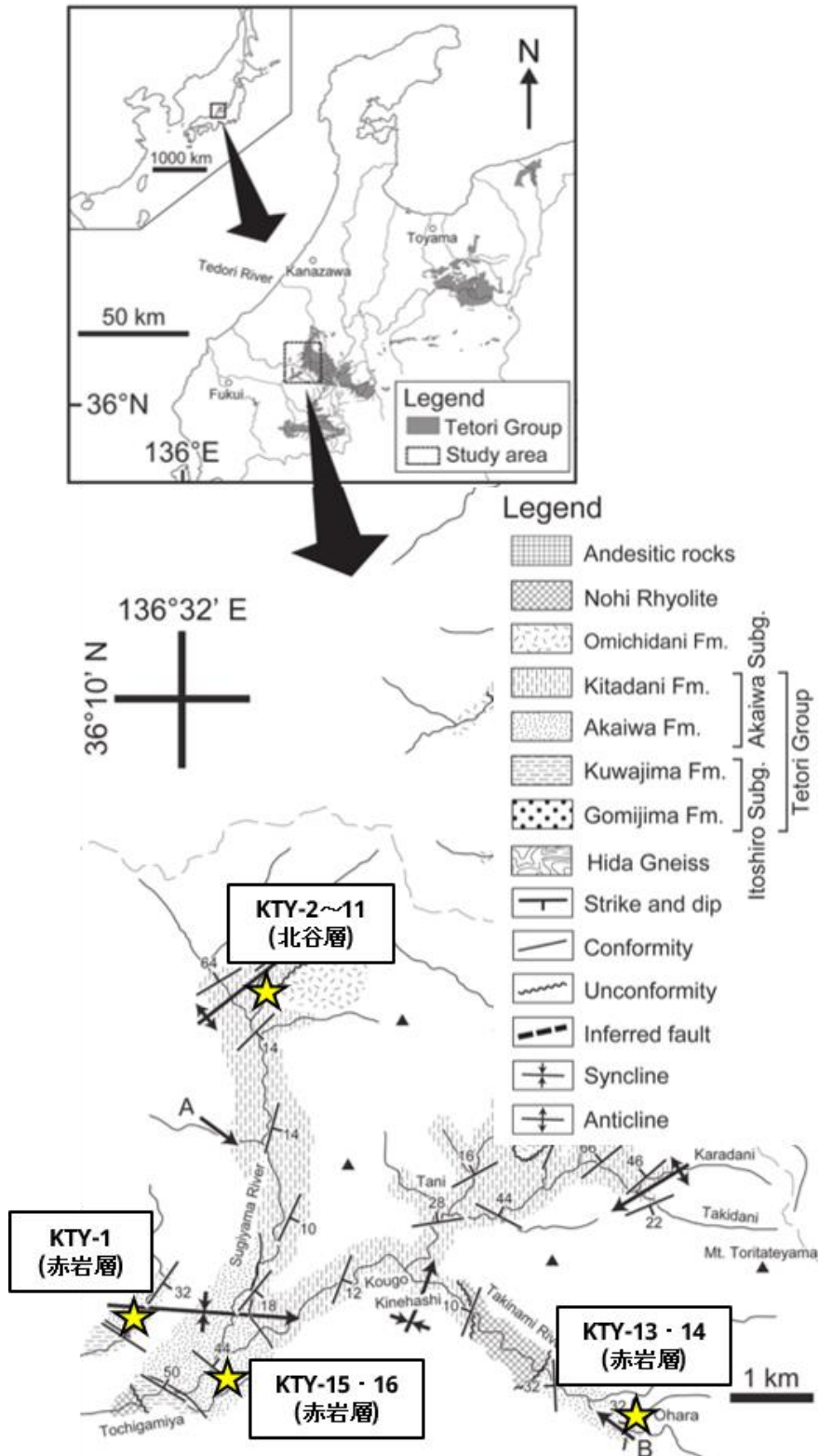


図1. 滝波川流域における赤岩層・北谷層の分布域と試料採取地点(酒井ほか, 2018 を改変)

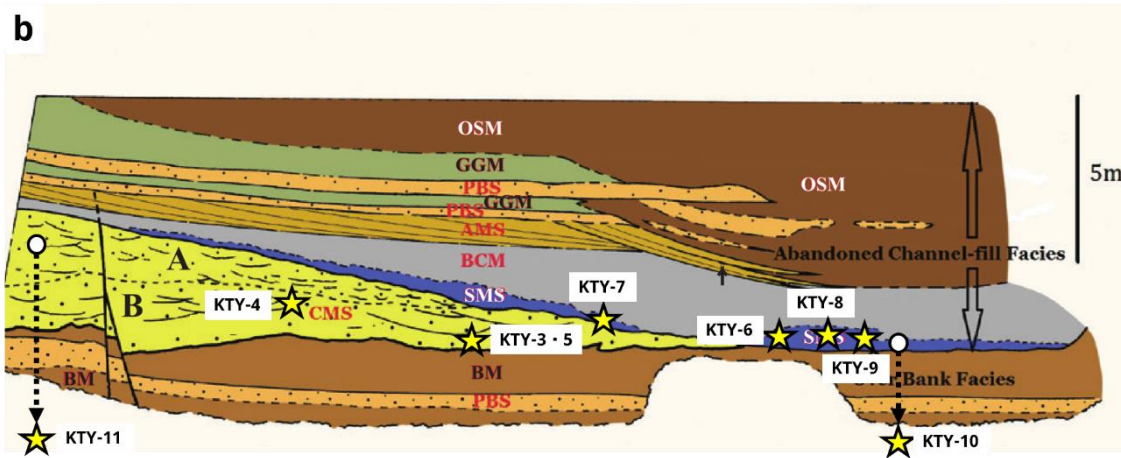
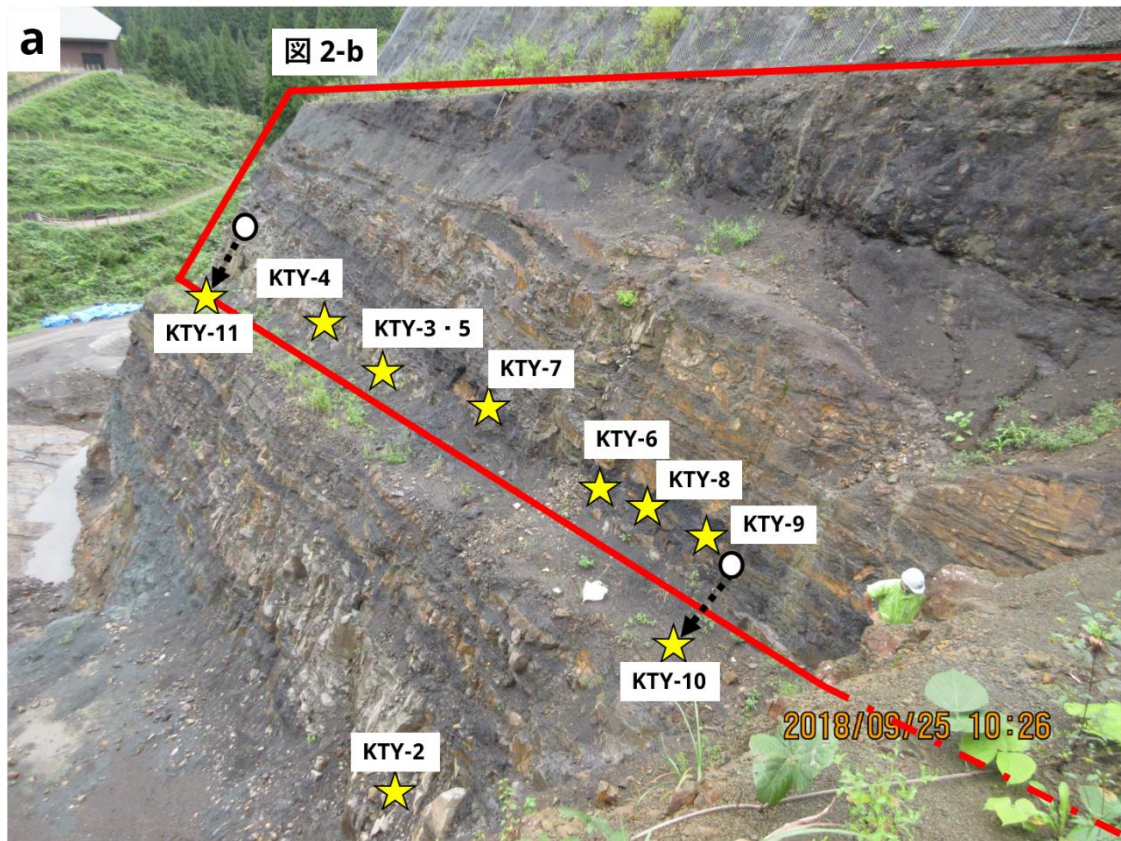


図 2. 恐竜化石発掘調査現場における北谷層砂岩試料の採取箇所

a. 露頭における試料採取箇所。KTY-10・11 に関しては、岩相の比較から白丸で示した付近の露頭から落下したと思われる転石を星印で示した箇所の地面にて採取した。そのほかの試料については星印で示した箇所において露頭から直接採取した。

b. a. において赤枠で示した範囲の露頭を堆積相ごとに区別したスケッチ(Suzuki et al., 2015 を改変)。

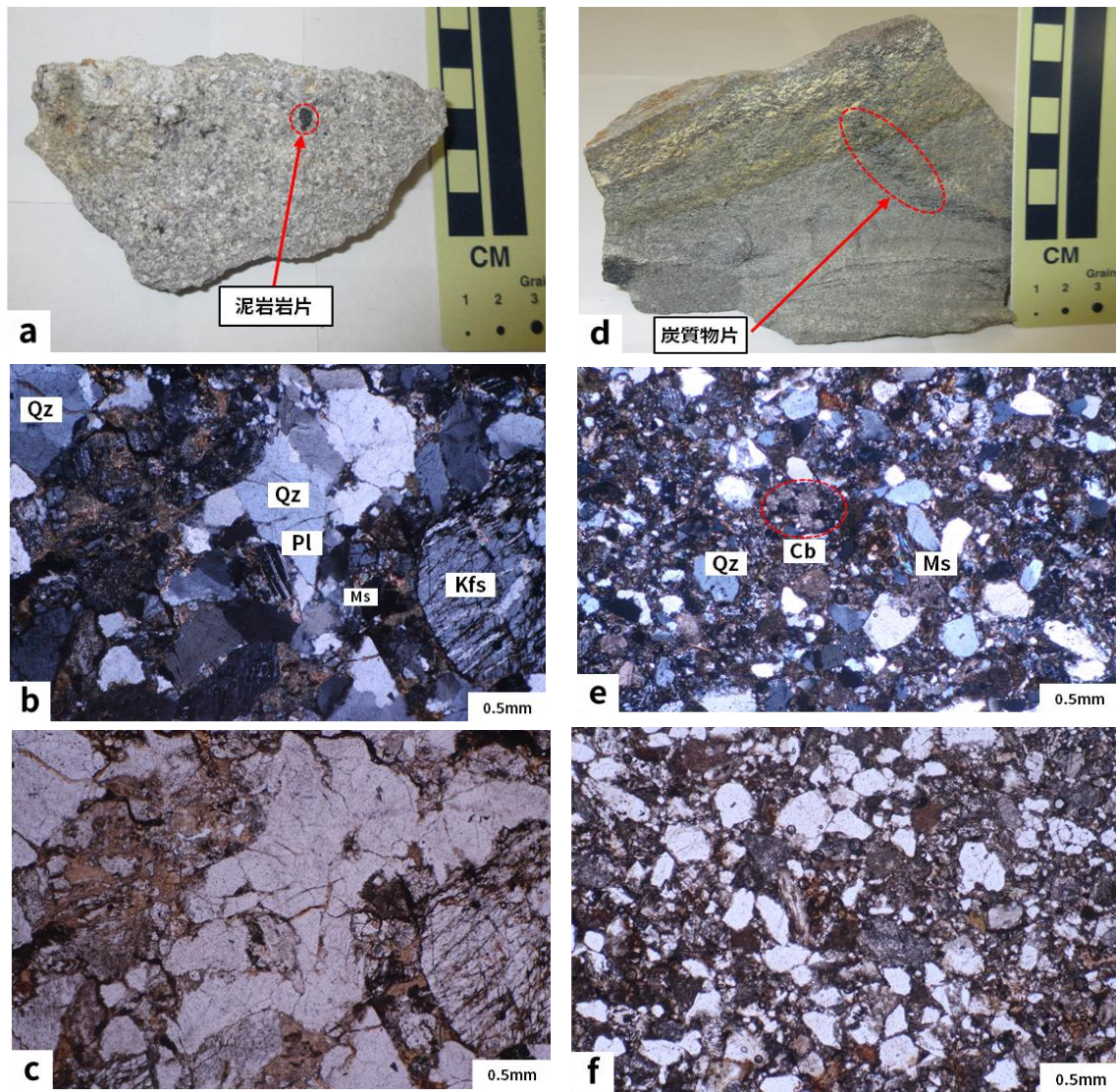


図3. グループ1・2の試料および偏光顕微鏡写真

a. 黒色泥岩岩片を含むKTY-13(グループ1)。

b・c. KTY-1(グループ1)の偏光顕微鏡写真(直交・開放ニコル)。

d. 炭質物片の濃集層を含むKTY-2(グループ2)。

e・f. KTY-2の偏光顕微鏡写真(直交・開放ニコル)。

Qz : 石英、Pl : 斜長石、Ms : 白雲母、Kfs : カリ長石、Cb : 炭酸塩鉱物(セメント)

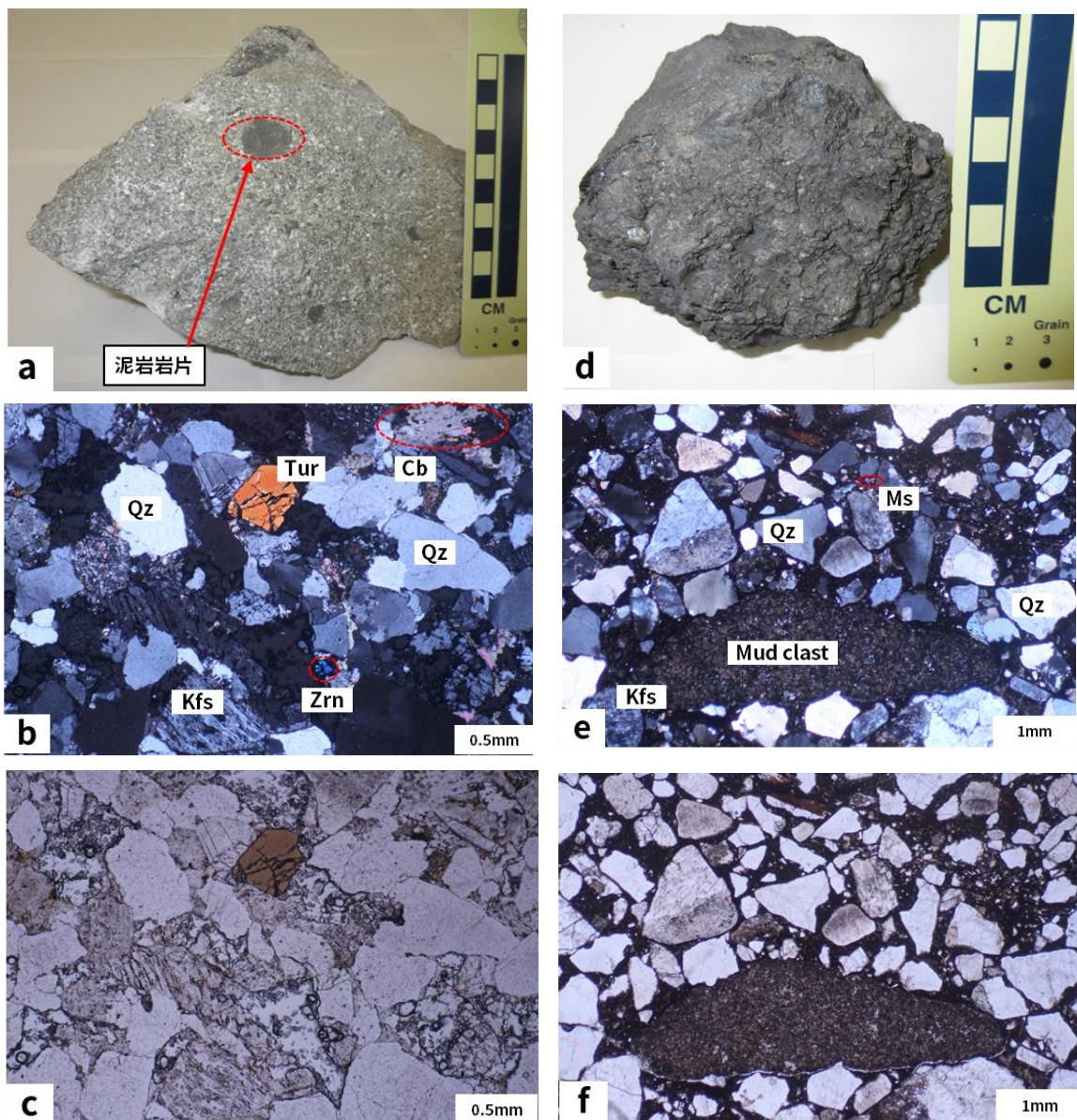


図4. グループ3・4の試料および偏光顕微鏡写真

a. 黒色泥岩岩片を含むKTY-3(グループ3)。

b・c. KTY-5(グループ3)の偏光顕微鏡写真(直交・開放ニコル)。

d. 泥岩中の砂礫濃集部分であるKTY-10(グループ4)。

e. KTY-7の偏光顕微鏡写真(直交ニコル)。

f. KTY-7の偏光顕微鏡写真(開放ニコル)。周囲の基質の泥とは色や粒度が異なり、岩片であると判断できる。

Tur : 電気石、Zrn : ジルコン

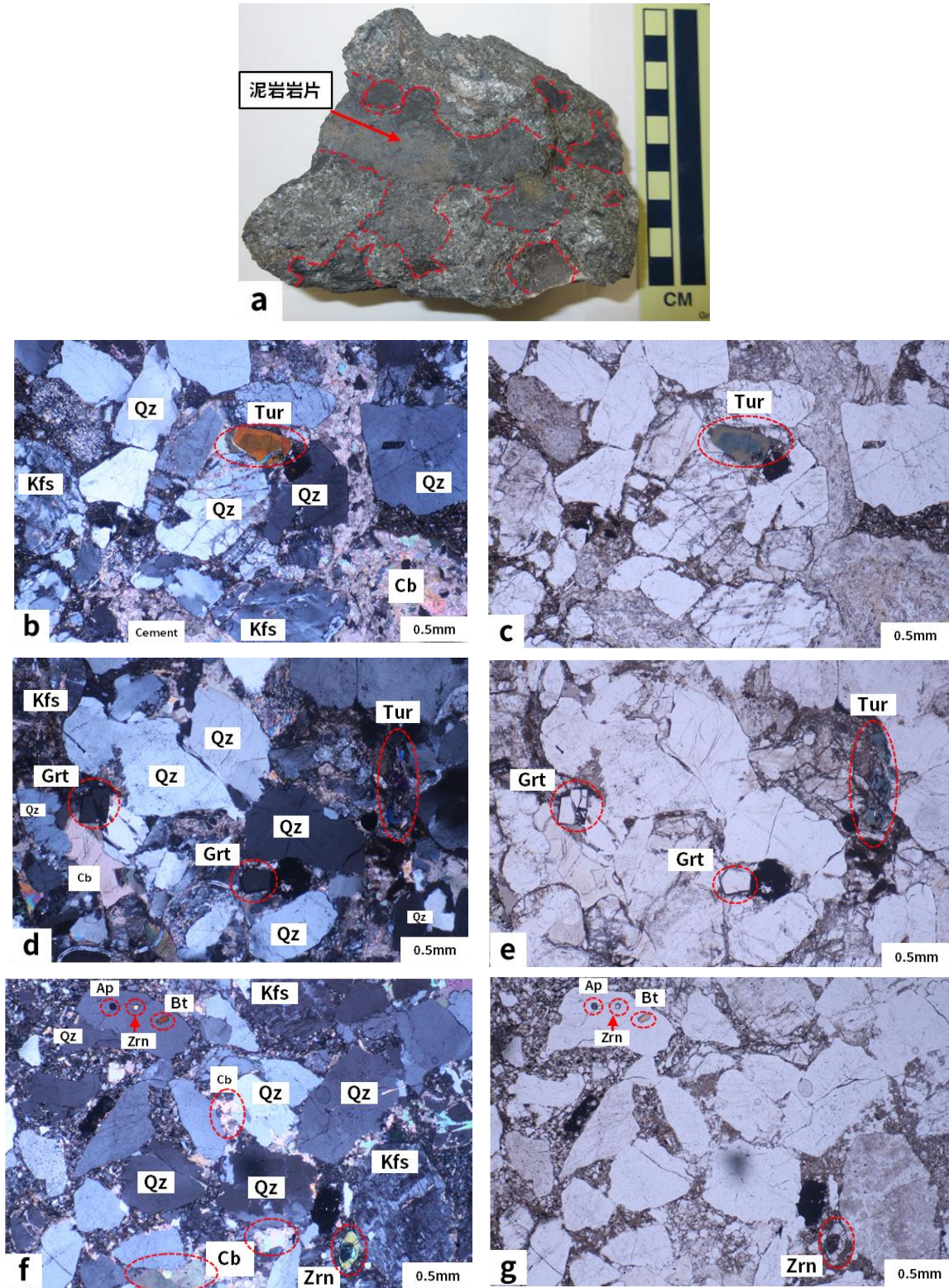


図5. グループ5(KTY-8)の試料写真および偏光顕微鏡写真

a. 試料写真。黒色泥岩の礫(岩片)をモード比で30%程度含む。

b・c. 組成累帯構造を示す電気石の偏光顕微鏡写真(直交・開放ニコル)。

d・e. 採取試料中で最も粗粒なざくろ石(Grt)の偏光顕微鏡写真(直交・開放ニコル)。

f・g. 異なるジルコン粒子を包有するジルコン(右下)と、石英中の燐灰石(Ap)、ジルコン、黒雲母(Bt)包有物(直交・開放ニコル)。

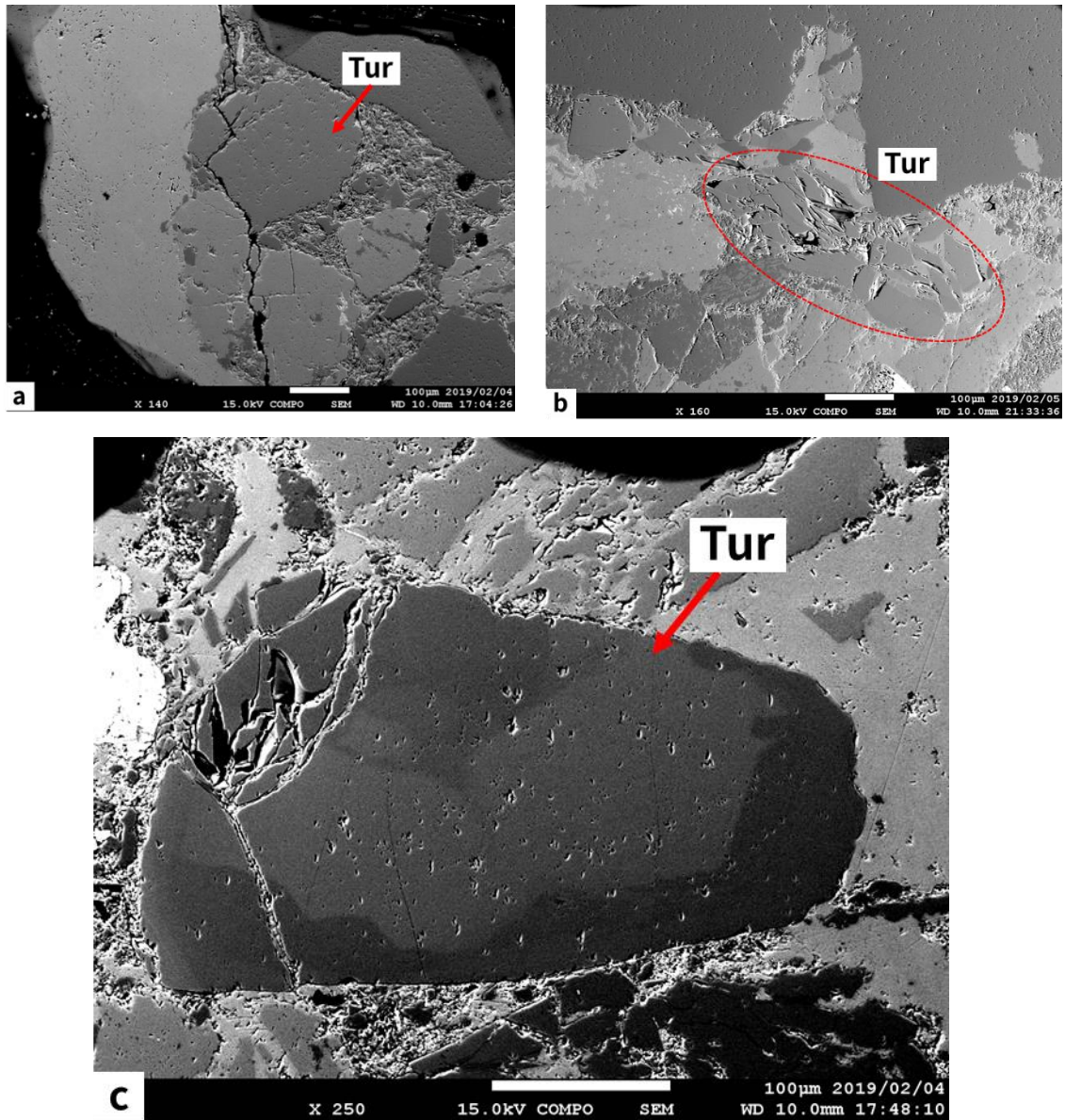


図6. KTY-8(グループ5)に含まれる砕屑性電気石の電子顕微鏡写真(組成像)

- a. 顕著な組成累帯構造を示さない砕屑性電気石(KTY-8-1)
- b. 顕著な組成累帯構造を示さない砕屑性電気石(KTY-8-2、図5-d・eで示した電気石)
- c. 顕著な組成累帯構造を示す砕屑性電気石(KTY-8-3、図5-b・cで示した、偏光顕微鏡観察でも顕著な組成累帯構造が観察された電気石)

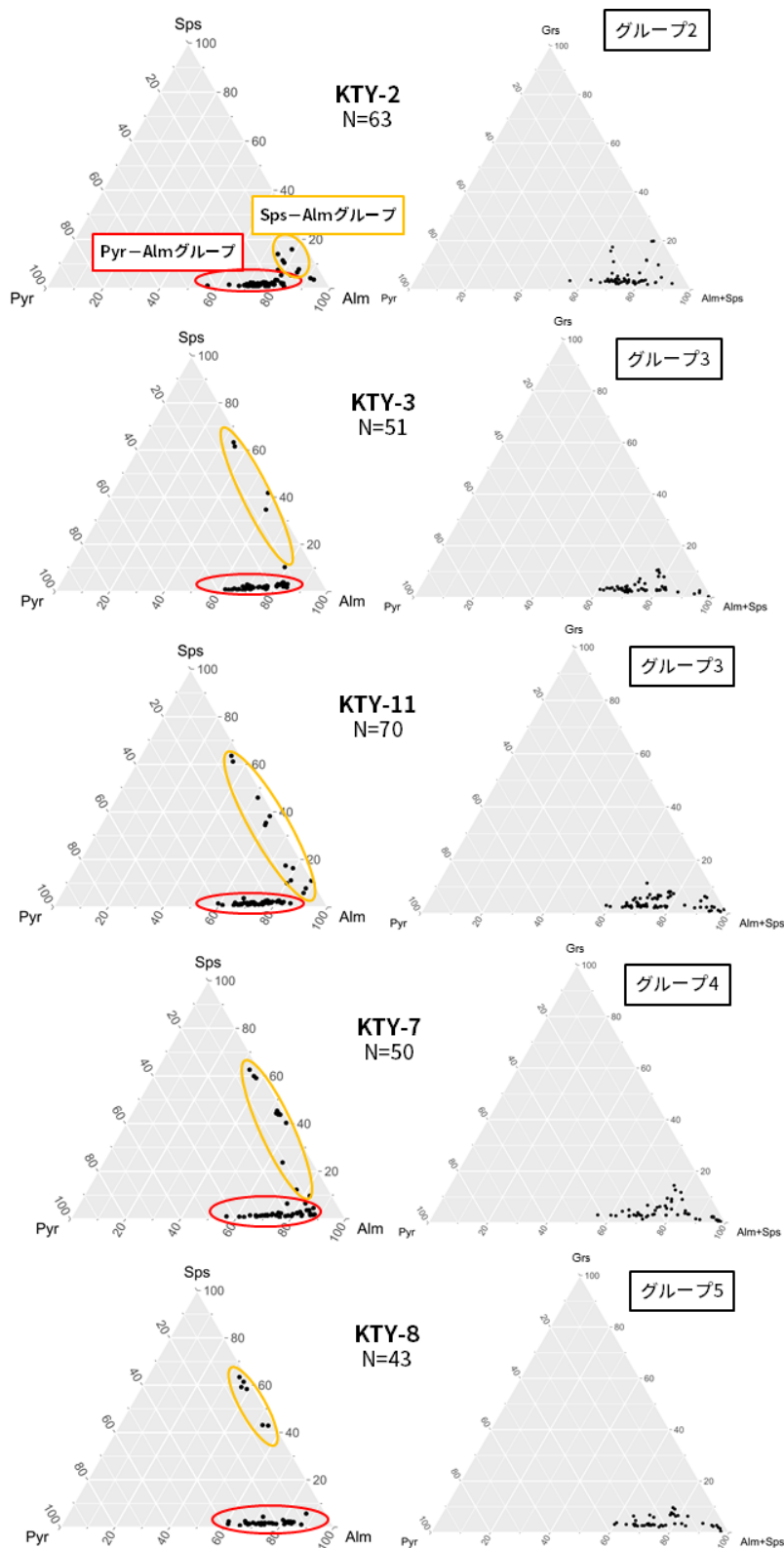


図7. グループ2～5の試料中に含まれる碎屑性ざくろ石の化学組成三角プロット(成分比はモル%)
 Pyr:パイロープ成分、Sps:スペツサルティン成分、Alm:アルマンディン成分、Grs:グロッシュユ
 ラー成分、N:主要元素化学組成を測定したざくろ石の個数

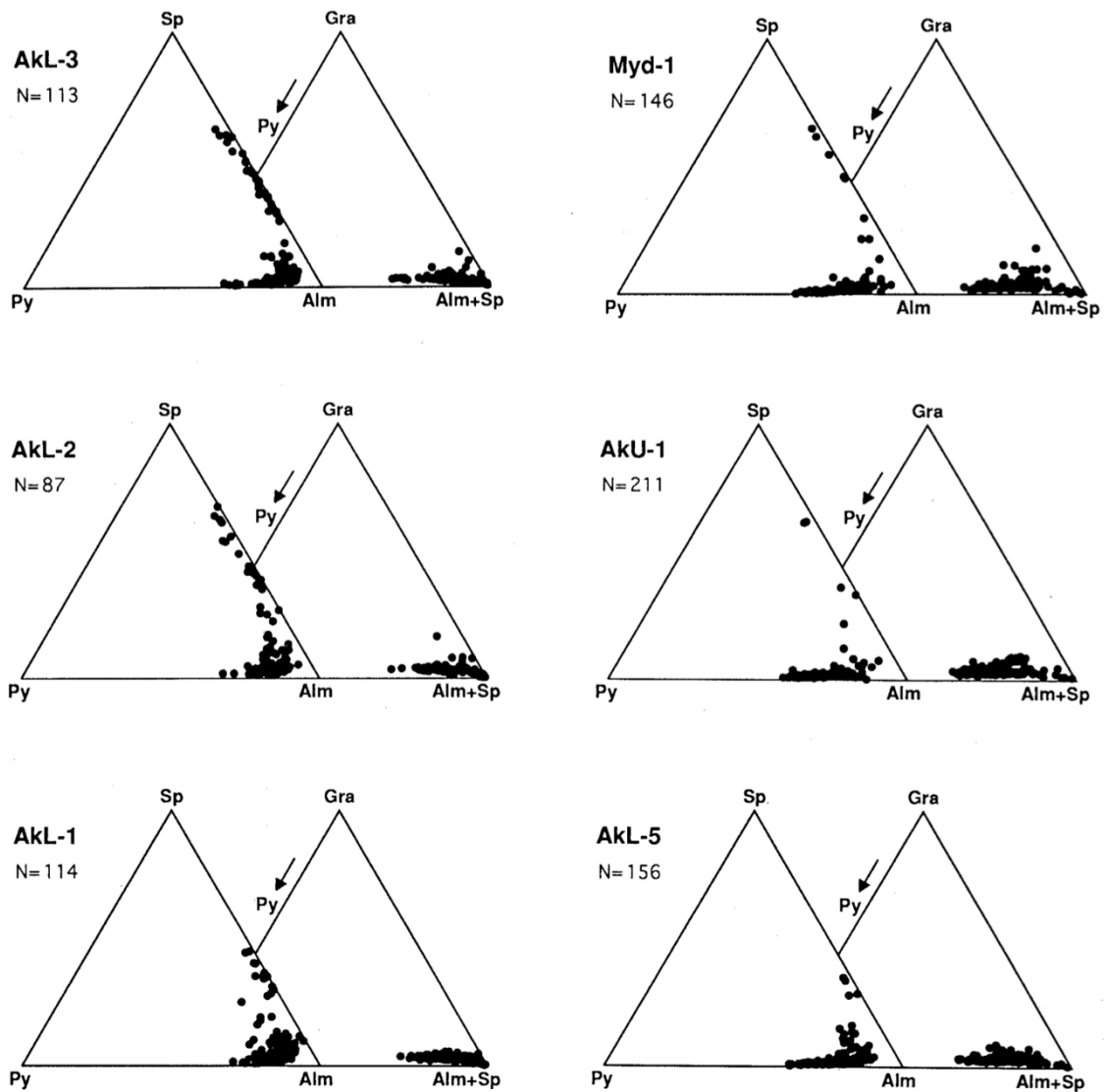


図8. 石川県南部・手取川上流域の白峰地域における手取層群赤岩亜層群赤岩層および明谷層(北谷層相当)中の砂岩に含まれる碎屑性ざくろ石のパイロープ(Py)成分—スペッサルティン(Sp)成分—アルマンディン(Alm)成分とパイロープ(Py)成分—グラナダイト(Gra)成分—アルマンディン(Alm)成分+スペッサルティン(Sp)成分(成分比はモル比)のそれぞれ三成分系で表した化学組成三角プロット(大林, 1995、一部抜粋)
 AKL-1~3・5、AkU-1: 赤岩層中の砂岩、Myd-1: 明谷層中の砂岩

表一覧

表 1. 本研究で採取した試料の採取地点に関する詳細

試料番号	層名	堆積相*	グループ	採取地点		採取地点詳細**
				緯度	経度	
KTY-1	赤岩層	—	1	36.10	136.53	高さ3m程度の一様な砂岩岩体。
KTY-13	赤岩層	—	1	36.09	136.59	高さ5m程度、幅3m程度の一様な砂岩岩体。
KTY-14	赤岩層	—	1	36.09	136.59	高さ・幅4m程度の一様な砂岩岩体。
KTY-15	赤岩層	—	1	36.09	136.54	KTY-16との層理面が地面に対し斜交する一様な砂岩露頭。
KTY-16	赤岩層	—	1	36.09	136.54	KTY-15との層理面が地面に対し斜交する一様な砂岩露頭。
KTY-2	北谷層	—	2	36.12	136.54	S-12砂岩層の延長部分(産出グリッド：D-5)。露頭には1mm程度の白雲母片と黒い炭質物片が層状に濃集している部分が見られた。
KTY-3	北谷層	CMS	3	36.12	136.54	S-11砂岩層(産出グリッド：I-5)。露頭には炭質物が層状に入っている部分が見られた。
KTY-4	北谷層	CMS	3	36.12	136.54	S-11砂岩層(産出グリッド：I-5)。KTY-3より上位と思われる部分。
KTY-5	北谷層	CMS	3	36.12	136.54	S-11砂岩層(産出グリッド：I-5)。KTY-4より上位と思われる部分。
KTY-11	北谷層	CMS	3	36.12	136.54	S-11砂岩層から落下したと思われる転石(産出グリッド：D-5)。
KTY-6	北谷層	SMS	4	36.12	136.54	黒色泥岩中の砂礫濃集部分(産出グリッド：D-5)。
KTY-7	北谷層	SMS	4	36.12	136.54	CMS相直上のSMS相黒色泥岩中の砂礫濃集部分(産出グリッド：D-5)。露頭では貝化石が見られた。
KTY-9	北谷層	SMS	4	36.12	136.54	黒色泥岩中の砂礫濃集部分(産出グリッド：D-5)。
KTY-10	北谷層	SMS	4	36.12	136.54	付近の露頭から落下したと思われる黒色泥岩中の砂礫濃集部分の転石(産出グリッド：D-5)。転石中には貝化石・炭質物層が多く見られた。
KTY-8	北谷層	SMS	5	36.12	136.54	SMS相黒色泥岩中に含まれる、固結した砂岩の岩塊。

* 恐竜化石発掘調査現場にて採取した試料が属する堆積相の分類・判断は Suzuki et al. (2015) に従った。ただし、KTY-2 については、Suzuki et al. (2015) は堆積相を判断していない。CMS : Coarse- to medium-grained sandstone subfacies、SMS : Slumped mudstone and sandstone subfacies。

** 北谷層の試料について、産出グリッドは恐竜化石発掘調査現場において化石の産出地点を記述するために用いられている区分を利用して (後藤, 2010 を参照)。また、CMS 相中の砂岩層については福井県立恐竜博物館による調査の際に、恐竜化石発掘調査現場において露出している砂岩層を層序学的上位から順に S-1 砂岩層、S-2 砂岩層・・・と呼んで区別しており、この区分に従って採取した砂岩層の名称を記載している。

表 2. 採取した砂岩試料の構成成分モード組成および堆積学的記載結果(次頁に続く)

試料グループ 試料番号	グループ1					グループ2
	KTY-1	KTY-13	KTY-14	KTY-15	KTY-16	KTY-2
基質	11	12	8	39	32	40
セメント	8	3	2	9	3	8
石英	42	57	58	34	47	31
単一結晶	18	32	37	21	37	27
多結晶	24	25	21	13	10	4
カリ長石	31	18	21	11	14	8
斜長石	8	6	6	3	3	12
岩片	—	3	5	—	—	—
重鉱物	tr	1	tr	4	1	1
ざくろ石	—	—	—	—	—	○
電気石	—	—	—	—	—	○
黒雲母	—	—	—	—	—	○
白雲母	○	○	○	○	○	○
緑泥石	○	○	○	○	○	○
ジルコン	○	○	—	—	○	○
燐灰石	○	—	—	○	○	○
スフェーン	—	—	—	—	—	—
不透明鉱物	○	○	○	○	○	○
堆積岩分類	粗粒砂岩	極粗粒砂岩	極粗粒砂岩	粗粒砂岩	粗粒砂岩	粗粒砂岩
砂岩分類*	長石質アレナイト	長石質アレナイト	長石質アレナイト	長石質アレナイト	長石質アレナイト	長石質ワッケ
円磨度	subangular	angular	angular	angular	angular	angular
淘汰	よい	よい	よい	悪い	悪い	悪い
色	明るい灰色	明るい灰色	薄い灰色	灰色	薄い灰色	灰色

* 砂岩の分類は岡田(1971)に従った。

表 2. 採取した砂岩試料の構成成分モード組成および堆積学的記載結果(続き)

試料グループ 試料番号	グループ3					グループ4				グループ5
	KTY-3	KTY-4	KTY-5	KTY-11	KTY-6	KTY-7	KTY-9	KTY-10	KTY-8	
基質	7	2	2	2	33	12	78	34	9	
セメント	10	13	16	22	—	—	—	—	17	
石英	54	63	50	50	29	47	13	47	27	
単一結晶	31	41	37	31	18	30	10	27	18	
多結晶	23	22	13	19	11	17	3	20	9	
カリ長石	15	14	23	17	15	23	5	9	10	
斜長石	10	6	5	6	8	8	tr	6	4	
岩片	3	1	3	3	13	9	3	3	30	
重鉱物	1	1	1	tr	2	1	1	1	3	
ざくろ石	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
電気石	○	—	○	—	○	○	○	○	○	
黒雲母	○	—	—	○	○	○	○	○	○	
白雲母	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
緑泥石	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
ジルコン	○	○	○	—	○	○	—	—	○	
燐灰石	○	—	—	—	—	—	—	—	○	
スフェーン	—	○	—	—	—	—	—	—	—	
不透明鉱物	○	○	○	○	—	○	○	○	○	
堆積岩分類	粗粒砂岩	極粗粒砂岩	粗粒砂岩	粗粒砂岩	粗粒砂岩	粗粒砂岩	泥岩	粗粒砂岩	極粗粒砂岩	
砂岩分類*	長石質アレナイト	石英質アレナイト	長石質アレナイト	長石質アレナイト	長石質ワッケ	長石質アレナイト	—	石英質ワッケ	石質アレナイト	
円磨度	subangular	angular	angular	subangular	subangular	subangular	subrounded	subangular	subangular	
淘汰	よい	よい	とてもよい	とてもよい	悪い	悪い	悪い	悪い	悪い	
色	灰色	灰色	灰色	灰色	黒っぽい	黒っぽい	黒っぽい	黒っぽい	緑がかった濃灰色	

tr : 全体に占める量比が1%未満、○ : 観察された、— : 観察されなかった、または分類の適用範囲外

表 3. 砕屑性電気石の代表的な主要元素化学組成

Sample No.	KTY-3	KTY-8-1	KTY-8-2			KTY-8-3		
wt%			Mean, N=18 ($\pm 1\sigma$)			Core	Rim	Mean, N=26
SiO ₂	35.47	34.75	34.17	34.90	34.20 (0.44)	35.72	35.35	35.27
TiO ₂	1.22	0.79	0.28	0.37	0.31 (0.12)	0.44	0.86	0.72
Al ₂ O ₃	31.93	32.67	33.79	34.05	33.56 (0.43)	33.46	33.37	33.00
Cr ₂ O ₃	0.17	0.00	0.00	0.10	0.04 (0.06)	—	0.08	0.03
FeO	7.35	8.06	11.92	12.39	12.11 (0.62)	11.09	8.29	9.48
MnO	—	—	0.08	0.23	0.16 (0.10)	0.17	0.22	0.09
MgO	5.66	5.47	2.22	2.02	2.06 (0.43)	2.87	4.96	3.96
CaO	1.18	1.03	0.44	0.54	0.47 (0.13)	0.26	0.68	0.50
Na ₂ O	1.66	1.92	1.80	1.83	1.94 (0.11)	1.80	1.79	1.79
K ₂ O	0.07	0.10	0.10	0.00	0.05 (0.05)	0.12	0.03	0.06
Total	84.71	84.79	84.80	86.43	84.90 (0.77)	85.93	85.63	84.90
wt%								
B ₂ O ₃ *	10.42	10.38	10.22	10.40	10.22 (0.10)	10.43	10.51	10.37
SiO ₂	35.47	34.75	34.17	34.90	34.20 (0.44)	35.72	35.35	35.27
TiO ₂	1.22	0.79	0.28	0.37	0.31 (0.12)	0.44	0.86	0.72
Al ₂ O ₃	31.93	32.67	33.79	34.05	33.56 (0.43)	33.46	33.37	33.00
Cr ₂ O ₃	0.17	0.00	0.00	0.10	0.04 (0.06)	—	0.08	0.03
FeO**	7.35	8.06	11.92	12.39	12.11 (0.62)	11.09	8.29	9.48
MnO	—	—	0.08	0.23	0.16 (0.10)	0.17	0.22	0.09
MgO	5.66	5.47	2.22	2.02	2.06 (0.43)	2.87	4.96	3.96
CaO	1.18	1.03	0.44	0.54	0.47 (0.13)	0.26	0.68	0.50
Na ₂ O	1.66	1.92	1.80	1.83	1.94 (0.11)	1.80	1.79	1.79
K ₂ O	0.07	0.10	0.10	0.00	0.05 (0.05)	0.12	0.03	0.06
Total	95.13	95.17	95.02	96.83	95.12 (0.87)	96.36	96.14	95.27
O=	29	29	29	29	29	29	29	29
B	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000	3.000
Si	5.915	5.817	5.809	5.833	5.819 (0.040)	5.951	5.849	5.910
Ti	0.153	0.099	0.036	0.047	0.039 (0.016)	0.055	0.107	0.091
Al	6.275	6.445	6.770	6.707	6.730 (0.064)	6.570	6.507	6.517
Cr	0.022	0.000	0.000	0.013	0.005 (0.008)	0.000	0.010	0.004
Fe ²⁺	1.025	1.128	1.694	1.732	1.723 (0.094)	1.545	1.147	1.329
Mn	—	—	0.012	0.033	0.023 (0.014)	0.024	0.031	0.012
Mg	1.407	1.365	0.563	0.503	0.522 (0.105)	0.713	1.223	0.989
Ca	0.211	0.185	0.080	0.097	0.086 (0.024)	0.046	0.121	0.091
Na	0.537	0.623	0.593	0.593	0.641 (0.038)	0.581	0.574	0.583
K	0.015	0.021	0.022	0.000	0.010 (0.010)	0.026	0.006	0.013
Total	18.559	18.683	18.578	18.557	18.599 (0.038)	18.512	18.576	18.537
Fe/(Fe+Mg)	0.421	0.452	0.751	0.775	0.768 (0.044)	0.684	0.484	0.574
Classification***	Dravite	Dravite	Schorl	Schorl	Schorl	Schorl	Dravite	Schorl

*酸素 29 とした時にホウ素のイオン数が 3 であるとして計算した B₂O₃ の質量%濃度

** 鉄は全て FeO として計算

*** 分類は Henry et al. (2011) に従った。ただし W サイトに入る元素は今回の分析では特定できないため、W サイトの元素による分類は行っていない。

表 4. 砕屑性ざくろ石の代表的な主要元素化学組成

Group	Group 2			Group 3			Group 4			Group 5					
Sample No.	KTY-2			KTY-3			KTY-11			KTY-7			KTY-8		
wt%															
SiO ₂	38.08	37.77	36.85	37.25	37.89	37.31	37.28	38.33	36.38	37.44	37.60	36.57	37.74	37.64	36.83
TiO ₂	0.06	—	—	0.01	—	0.01	0.05	—	—	0.09	0.23	0.15	0.05	0.01	—
Al ₂ O ₃	21.15	20.59	19.61	20.32	21.07	20.66	20.68	20.89	20.05	20.46	20.72	20.40	20.68	21.01	20.40
Cr ₂ O ₃	0.03	0.16	—	0.08	0.05	—	—	—	—	0.12	0.13	0.10	—	—	—
FeO*	32.81	34.69	35.10	35.91	32.65	35.69	35.18	32.21	37.07	33.98	32.84	35.83	34.77	32.85	37.27
MnO	1.00	0.25	3.17	0.95	0.75	1.68	0.84	0.71	3.27	0.50	0.77	2.80	0.61	0.52	2.42
MgO	5.59	5.40	1.67	4.43	6.72	3.54	4.90	6.77	0.96	5.24	7.20	2.78	5.09	6.70	1.74
CaO	1.17	1.09	3.60	0.95	0.84	1.02	1.01	1.09	2.09	2.15	0.51	1.21	1.01	1.22	1.23
Na ₂ O	—	0.01	0.01	0.02	—	0.10	—	—	0.18	0.01	—	0.09	0.06	—	—
K ₂ O	0.11	0.04	—	0.07	0.03	—	0.06	—	—	—	—	0.06	—	0.05	0.11
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
O=	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
Si	6.028	6.018	6.026	5.998	5.984	6.014	5.975	6.036	5.988	5.978	5.948	5.952	6.021	5.956	6.016
Ti	0.007	—	—	0.001	—	0.001	0.006	—	—	0.010	0.027	0.018	0.005	0.001	0.000
Al	3.946	3.867	3.779	3.856	3.922	3.926	3.906	3.877	3.890	3.851	3.862	3.912	3.888	3.918	3.928
Cr	0.004	0.021	—	0.011	0.006	—	—	—	—	0.015	0.016	0.013	—	0.000	0.000
Fe ²⁺	4.344	4.623	4.800	4.835	4.313	4.811	4.715	4.242	5.103	4.538	4.344	4.878	4.640	4.347	5.091
Mn	0.134	0.033	0.438	0.129	0.100	0.229	0.114	0.095	0.456	0.068	0.103	0.387	0.083	0.070	0.335
Mg	1.318	1.283	0.408	1.064	1.582	0.850	1.172	1.590	0.235	1.248	1.698	0.676	1.210	1.579	0.425
Ca	0.198	0.186	0.631	0.163	0.142	0.176	0.174	0.185	0.368	0.368	0.087	0.211	0.173	0.207	0.215
Na	—	0.003	0.003	0.007	—	0.030	—	0.000	0.057	0.003	—	0.028	0.019	—	—
K	0.023	0.009	—	0.015	0.006	—	0.012	—	—	—	—	0.012	—	0.010	0.023
Total	16.001	16.044	16.086	16.078	16.055	16.037	16.072	16.025	16.096	16.080	16.086	16.087	16.039	16.089	16.032
Pyr	21.990	20.954	6.494	17.183	25.784	14.015	18.976	26.018	3.806	20.063	27.252	10.984	19.830	25.459	7.003
Alm	72.469	75.474	76.464	78.101	70.276	79.313	76.360	69.411	82.813	72.929	69.697	79.308	75.985	70.077	83.935
Sps	2.230	0.544	6.984	2.082	1.628	3.774	1.843	1.549	7.402	1.093	1.661	6.285	1.355	1.130	5.525
Grs	3.311	3.029	10.057	2.634	2.313	2.898	2.820	3.021	5.979	5.915	1.391	3.424	2.829	3.335	3.538

* 鉄は全て FeO として計算

Pyr : パイロープ成分、Sps : スペッサルティン成分、Alm : アルマンディン成分、Grs : グロッシュラー成分