

巡検案内書

四阿火山：成層火山体の開析地形とその利用*

Dissected geomorphology of the Azumaya Volcano and its application*

竹下欣宏¹ 西来邦章² 富樫 均³

概要

Yoshihiro Takeshita¹, Kuniaki Nishiki²
and Hitoshi Togashi³

2015年2月16日受付.

2015年5月12日受理.

* 日本地質学会第122年学術大会(2015年・長野)
巡検(4班)案内書

¹ 信州大学学術研究院教育学系
Institute of Education, Shinshu University,
6-ro, Nishinagano, Nagano 380-8544, Japan

² 産業技術総合研究所活断層・火山研究部門
Institute of Earthquake and Volcano Geology,
Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba
Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki
305-8567, Japan

³ 長野県環境保全研究所自然環境部
Natural Environment Division, Nagano Na-
ture Conservation Research Institute, 2054-
120, Kitago Nagano 381-0075, Japan

Corresponding author: Y. Takeshita,
takey@shinshu-u.ac.jp

(注)本原稿のカラー版PDFがJ-STAGEでご覧い
ただけます。「巡検案内書」の冊子掲載に関わる
詳細は、本誌 p.261 を参照して下さい。

見学コース

JR 長野駅→須坂市野辺→米子の滝駐車場→不動滝→権現滝→権現沢上流(登山道沿い)→米子硫黄鉱山跡→鉱山事務所跡→米子の滝駐車場→JR 長野駅

見学地点

- | | | |
|--------|---------------------------|-----------------------------|
| Stop 1 | (36°38'18"N, 138°18'59"E) | 須坂市野辺臥竜橋(百々川)：四阿火山周辺の地形・地質 |
| Stop 2 | (36°34'5"N, 138°24'16"E) | 不動滝：米子溶岩と米子凝灰角礫岩 |
| Stop 3 | (36°34'5"N, 138°24'21"E) | 不動寺裏の登山道(Short stop)：権現滝の遠望 |
| Stop 4 | (36°34'2"N, 138°24'26"E) | 大黒沢・権現沢間の登山道：四阿カルデラと地すべり地形 |
| Stop 5 | (36°33'56"N, 138°24'22"E) | 権現沢：熱水変質帯と廃坑から流出する酸性水 |
| Stop 6 | (36°34'16"N, 138°24'23"E) | 米子硫黄鉱山跡：硫黄鉱床と米子大瀑布遠望 |
| Stop 7 | (36°34'22"N, 138°24'24"E) | 米子硫黄鉱山事務所跡：四阿カルデラと米子溶岩 |

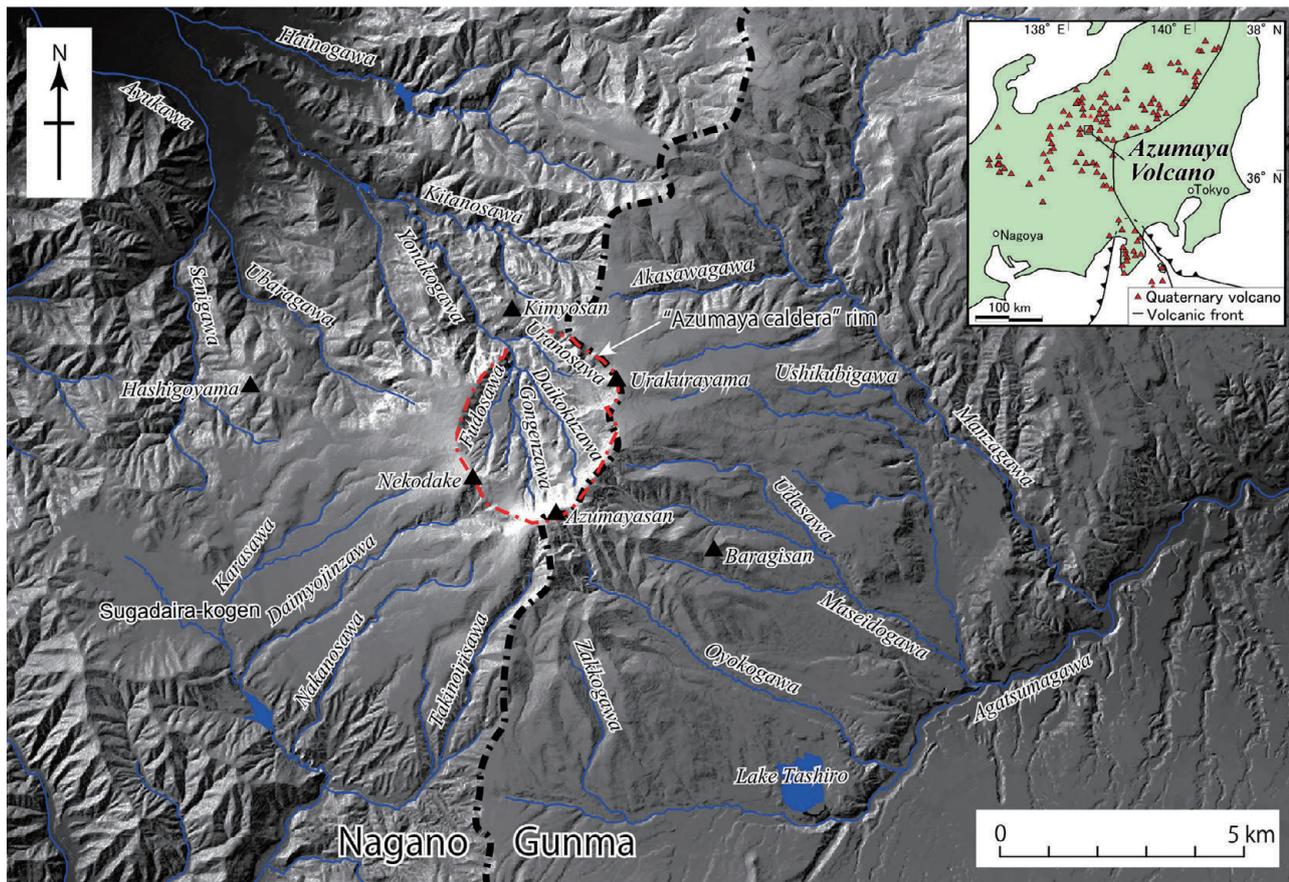
四阿火山は長野・群馬県の県境に位置し、約80万年前～45万年前にかけて活動した大型の成層火山である。環状に連なる稜線によって囲まれた“四阿カルデラ”と呼ばれる直径3kmほどの凹地が、地形的な特徴である。このカルデラから流れ出る米子川の上流域には、厚さ150mに達する溶岩層が作る断崖絶壁が約1kmも続き、不動滝や権現滝をはじめとする落差70～80mほどの複数の滝が見られる。また、カルデラ内には硫黄鉱床が存在し、1960(昭和35)年まで米子硫黄鉱山として採掘が続けられた。このほか周辺には、中世の山岳修験道に由来をもつ米子不動奥之院や但唱上人が木食行を行ったと伝えられる遺跡も存在する。本コースでは、四阿カルデラ、不動滝や権現滝といった成層火山体の開析地形とそれらを構成する火山岩類を観察するとともに、米子硫黄鉱山跡や米子不動奥之院といった人文的景観についても見学する。

Keywords

四阿火山, 成層火山, 開析地形, 四阿カルデラ, 米子硫黄鉱山, 米子の滝
Azumaya volcano, stratovolcano, dissected geomorphology, Azumaya caldera, Yonako Sulfur Mine, Yonako-no-taki

地形図

1:25,000 「四阿山」, 「須坂」



第1図. 四阿火山の位置と地形. 第四紀火山の分布は中野ほか(2013)による. 陰影図には北海道地図株式会社GISMAP(10 mメッシュ数値標高データ)を用いた. 赤点線は“四阿カルデラ”の縁を示す.

Fig. 1. Index and relief map of Azumaya volcano and surrounding area. The distribution of Quaternary volcanoes is after Nakano et al. (2013). The relief map was created using GISMAP (10-m-mesh digital elevation data) released by Hokkaido Chizu Co. Ltd. The red dashed line shows the rim of “Azumaya caldera”.

はじめに

あずまや
四阿火山は長野・群馬県の県境に位置し(Fig. 1), 約80万年前~45万年前に活動した大型の成層火山である(金子ほか, 1989; 西来ほか, 2014). 浦倉山(2,091 m), 四阿山(2,354 m), 根子岳(2,207 m)を含む山頂域の稜線が環状に連なり, それによって囲まれた“四阿カルデラ”と呼ばれる直径3 kmほどの凹地が, この火山の地形的特徴となっている(Figs. 1, 2). “四阿カルデラ”という名称は, 八木(1941)によりはじめて使用され, その後, 孺恋村誌編集委員会編(1977), 塩野入(1983), 小林ほか(2011)などでも用いられている. “四阿カルデラ”の成因については, 本間(1931)以降, 八木(1941), 太田・片田(1955)などで大爆発火口, 爆発カルデラという言葉が用いられていることから, 古くは爆発的噴火が成因であると考えられてきたようであるが, いずれの研究にもカルデラを生じさせた噴出物などの根拠となる記載はない. その後, “四阿カルデラ”は, 四阿蓑原軽石の噴出による陥没カルデラ(荒牧・早川, 1996)あるいは山頂部の崩壊による地形(西来ほか, 2014)と指摘されたが, 現在のカルデラ状の地形と蓑原軽石の噴出源との関係は明らかに

されておらず, 崩壊イベントによる堆積物も今のところ発見されていない. “四阿カルデラ”という名称は, すでに市町村誌や地域の地形・地質を紹介する普及書でも用いられ広く浸透しているため, これを四阿火山山頂部に見られる直径3 kmほどの凹地を指す地名として用いる.

“四阿カルデラ”から米子川が流れ出る付近(標高1350~1500 m)には, 厚さ150 mに達する溶岩層が作る断崖絶壁が約1 kmも続き, 落差70~80 mほどの複数の滝が見られる(Fig. 3). これらのうち, 不動滝と権現滝(Fig. 4)は, 「米子の滝」と呼ばれ古くから親しまれてきた. 1890(明治33)年に発表された森鷗外の「みちの記」や1925(大正15)年に長野電鉄株式会社により作成された「長野電車名勝案内」にも「米子の滝」との名称が登場する. さらに, この2条の滝は, 1990年に日本の滝百選に選ばれ「米子大瀑布」と呼ばれ全国的に知られるようになった. 滝の幅や流量がさほどでないにも関わらず, 大瀑布と呼ばれる所以は, 落差が大きいくとだけでなく, 滝のかかる岩壁とその後方に悠然と広がる“四阿カルデラ”が組み合わさって生み出される壮大な景観に負うところが大きい.

“四阿カルデラ”内の火山岩類は広く熱水変質作用を被って



第2図. 根子岳北方から望む四阿カルデラの全景. 撮影地点を第10図に示す.
 Fig. 2. Photograph of "Azumaya caldera", viewed from north of Nekodake. The viewpoint is shown in Fig. 10.



第3図. 米子溶岩層が形成する岩壁. 撮影地点を第10図に示す
 Fig. 3. Cliffs formed by the Yonago lavas. The viewpoint is shown in Fig. 10.



第4図. 米子の滝(左, 権現滝; 右, 不動滝).
 Fig. 4. Yonako Great Waterfalls. Left, Gongen daki; right, Fudo daki.

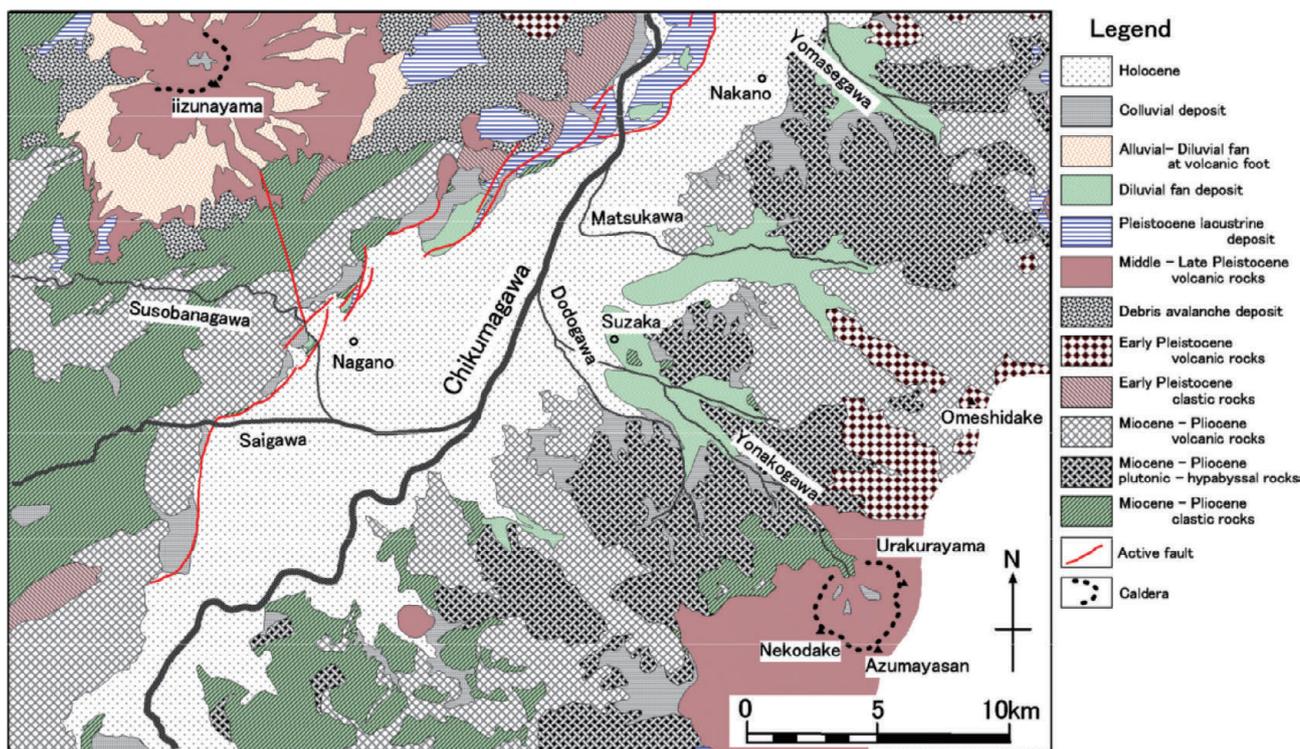
おり, 米子川上流の^{だいこくだき}大黒滝を中心とする一帯に硫黄鉱床が存在する(太田・片田, 1955). この鉱床は1960(昭和35)年まで米子硫黄鉱山として採掘が続けられた. この鉱山は, 寛永年間(1630年代)に近江の治兵衛が硫黄の採掘をはじめたとの記録が残るが, さらにさかのぼる可能性も指摘されて

いる(宮澤, 2014). また, 不動滝の下流右岸には, 中世の山岳修験道に由来をもつ^{よなこふどうおくのいん}米子不動奥之院があり, 鎌倉時代初期の仏師運慶の作とされる不動明王が本尊として祀られる. このほかにも, 米子川右岸の^{きみよさんだいら}奇妙山平と呼ばれる緩斜面には, ^{たんしやう}但唱上人が木食行を行ったと伝えられる遺跡が残る(宮澤, 2014). 以上のように不動滝と権現滝を含む“四阿カルデラ”一帯は, 成層火山体の開析によって生み出された壮大な自然景観を呈するだけでなく, 産業と信仰を通して古くから人が関わってきた人文的景観の要素も多分に包含している.

これまで“四阿カルデラ”の成因は詳しく検討されていなかったが, “四阿カルデラ”とその周辺の地形, 地質, 溶岩層の年代値を整理したところ, 米子川による激しい下方侵食と大規模な熱水変質帯における地すべりの相互作用が, “四阿カルデラ”を形成した主要な要因である可能性が示唆された. 今回の巡検では, “四阿カルデラ”および「米子の滝」の成り立ちを中心に, 米子硫黄鉱山跡や米子不動奥之院といった人文的景観にも目を向け, 成層火山体の開析地形と人の関わりについて実感していただくことを本コースの目的とする.

地形・地質概説

四阿火山西方に位置する^{ぜんこうじだいら}長野盆地は善光寺平とも呼ばれ,



第5図. 四阿火山周辺の地質図. 新版長野県地質図作成委員会編[URL]をもとに, 許可を得て簡略化し再編集した。
Fig. 5. Geological map of the area surrounding Nagano Basin including Azumaya volcano (modified after Editorial Committee of the New Geological Map of Nagano Prefecture, [URL]).

千曲川中流域の長野市を中心に, 幅約 10 km, 長さ約 40 km (下流の飯山盆地を除く場合)の低平地をもつ北東南西方向へ細長くのびた内陸盆地である。盆地の西には西山(水内丘陵)と呼ばれる標高数百 m から千数百 m の山々が, 東には標高千数百 m から 2000 m 級の山々からなる河東山地(三国山脈の一部)が対峙する。四阿火山を含む長野盆地周辺地域の地質概略図を Fig. 5 に示す。山地の地質構成は, 千曲川を境に東と西で大きく異なる。西山は主に中新世から中期更新世にかけて北部フォッサマグナに堆積した海成(一部は汽水成から湖沼成)の碎屑岩類や海底火山噴出物等の地層から構成されており, それらを基盤にして, 中期更新世以降に陸上で活動した飯縄(綱)火山・黒姫火山などの火山(妙高火山群など)が南北方向に並ぶ(加藤・赤羽, 1986; 長森ほか, 2003; 早津, 2008)。飯縄火山・黒姫火山の山頂付近には直径 2~1.5 km の北西側に開いた小カルデラが認められ, そのカルデラ開口部の下方には岩屑なだれ堆積物が分布する(早津, 2008)。一方, 四阿火山を含む東側の河東山地は, 一部に中新世の海成層が分布するものの, 大半は中新世~中期更新世にかけて形成された深成岩類~半深成岩類と中新世~後期更新世の火山岩類の分布で占められる(太田・片田, 1955; 中野ほか, 1998; 赤羽・竹下, 2011)。地形的にみると, 長野盆地平坦部の西縁は北東南西方向の直線的な急崖の連続で画されているのに対し, 東縁は壮年期の侵食山地の複数の尾根が, 岬のように盆地内に張り出す形状を示す(Fig. 5)。これら東西の地形の対照的な違いは, 盆地の形成史に密接に関

わっている。加藤・赤羽(1986)によれば, 盆地北西縁には長野盆地北西縁構造線と呼ばれる活断層帯(長野盆地西縁活断層帯)があり, 最新の断層活動とともに盆地に対して相対的に西側の山地が隆起している。一方, 東側の河東山地は, 中期中新世以降の隆起帯ないし非沈降帯であり, 現在は北西方向に傾動している。河東山地の西麓斜面には深成岩や半深成岩が広く露出することや, 山体の奥まで深い谷が刻まれていることから, 河東山地が西山よりも長期にわたる隆起と激しい侵食を受けてきたことがわかる。また河東山地が更新世以降に盆地側へ傾動していることは, 大きな谷の出口に更新世の扇状地が広がり, その扇状地面がより急勾配で完新統の扇状地面に接し, さらにその下に埋没している様子によく表れている(Fig. 5)。

四阿火山は, 北部フォッサマグナで認められる火山フロントの屈曲部付近に位置し, その周辺には浅間・烏帽子・草津白根・御飯火山など前期~中期更新世以降に活動した第四紀火山が多く分布する(中野ほか, 2013)。とくに長野と群馬の県境(上信国境)をなすほぼ南北の稜線沿いには新旧の火山碎屑岩や溶岩類が密に分布し, ところどころ強く熱水変質を受けて粘土化するとともに, それらを母岩とした硫黄鉱床が高密度で形成されている。この地域一帯では近世の時代から複数の硫黄鉱山が開かれ, 昭和の初期から昭和 30 年代にかけての最盛期には, 数千人規模の鉱山の町も形成された。しかし時代とともに硫黄の生産技術が大きく様変わりし, 昭和 40 年代までの稼行を最後に, 現在ではすべてが閉山してい



第6図. 四阿火山の山容. a)北西側(長野市若槻西条), b)南側(烏帽子岳).
Fig. 6. Photographs of Azumaya volcano, viewed a) from the northwest of the volcano (Wakatsuki-Nishijo, Nagano city), and b) from the south of the volcano (Ebosi-dake).

る。かつて米子川上流の四阿火山のカルデラにあった米子鉾山は、その代表的なもののひとつである。

四阿火山の山腹には大小多くの谷があり、山頂域から放射状に沢が流れ出している。それらは四阿山山頂と北の浦倉山を結ぶ稜線を境に、日本海へそぞく千曲川水系と太平洋へと注ぐ利根川水系に大別される。利根川水系に比べ千曲川水系の河川の方が、深く険しい谷を刻んでいる(Fig. 1)。千曲川水系の河川のうち、米子川は“四阿カルデラ”内部の水を集め、北西側の長野盆地へと流れ出している。米子川が“四阿カルデラ”から外へ流れ出る付近では、比高が100~150mの絶壁が連続し、不動滝と権現滝をはじめとする多くの滝がかかる(Fig. 4)。カルデラ内には米子川の源流部である不動沢、権現沢、大黒沢、裏ノ沢(奇妙沢)などの谷が発達し、谷頭を山頂付近までのぼしている。

四阿火山の西~北側には梯子山(1,513 m)をはじめ、基盤岩類が標高の高いところまで分布しており(Fig. 5)、それらの古い地質体に阻まれて成層火山特有の緩やかな広い裾野はあまり発達しない(Fig. 6a)。一方の南~東側では基盤岩は露出せず標高1,000 m付近まで四阿火山の噴出物が分布し、根子岳の南西側や浦倉山の東側に成層火山特有の緩やかな広い裾野が発達する(Fig. 6b)。これに対して四阿山の南東側は、大横川や馬洗井戸川によって侵食され、茨木山一帯はやや開析が進んでいる(Fig. 1)。四阿火山の地質と活動史については次項で記述する。

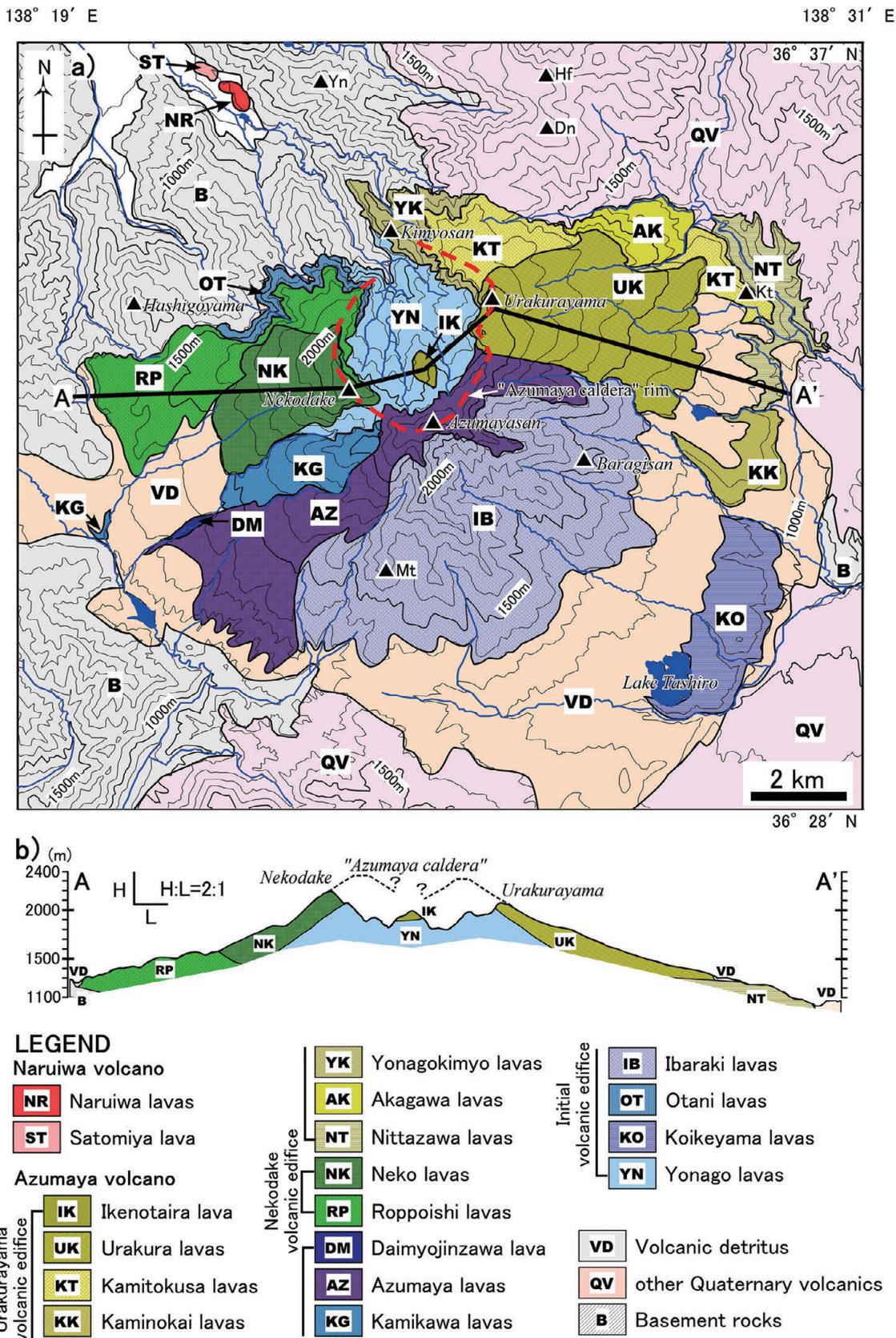
四阿火山の活動史

四阿火山は、噴出物の分布と活動年代、地形の開析の程度から、約80万年前~55万年前に活動した初期火山体、約

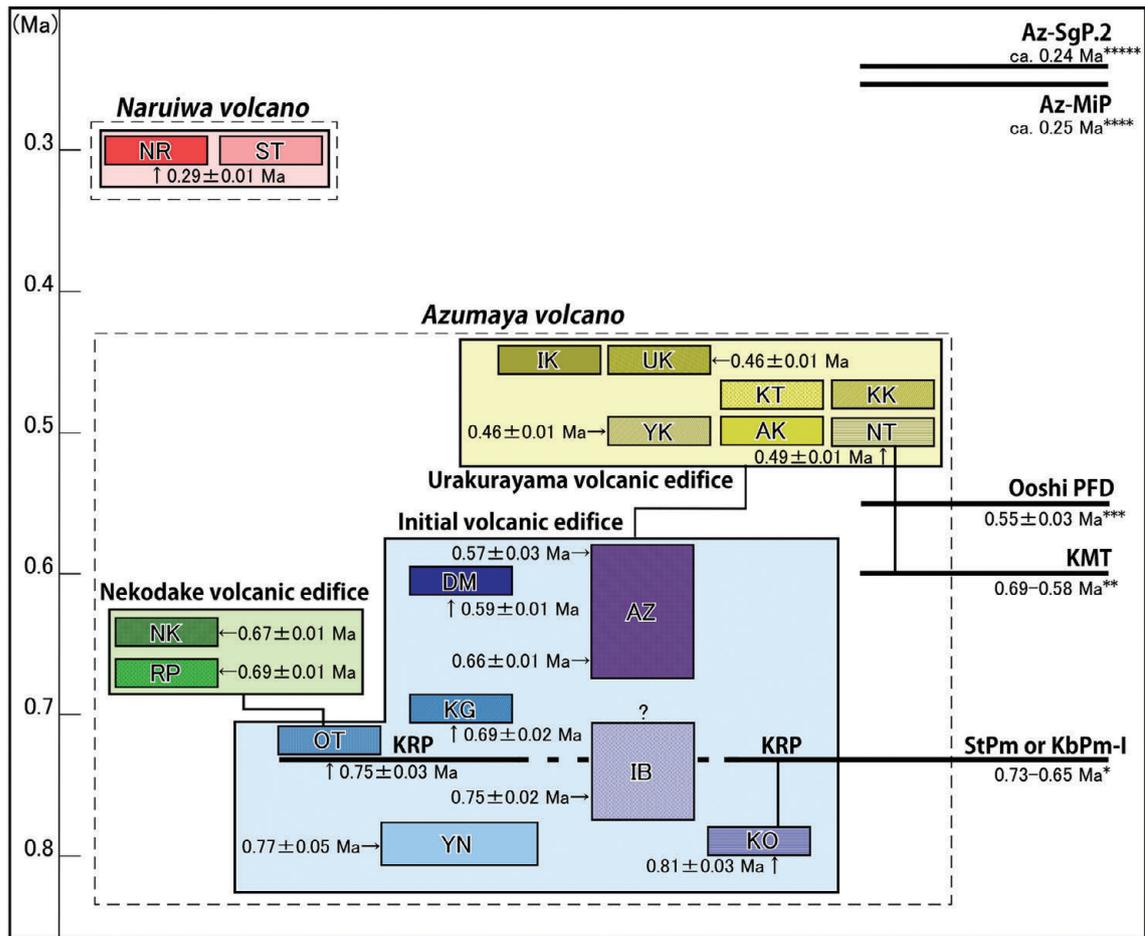
70万年前~65万年前に活動した根子岳火山体、約50万年前~45万年前に活動した浦倉山火山体に分けられる(西来ほか, 2014)。また、北関東に分布する中期更新世テフラのうち、四阿火山起源とされているテフラは、四阿蓑原軽石層(Az-Mip: 矢口・田辺, 1990; 町田・新井, 2003)、菅平第2軽石(Az-SgP.2: 鈴木・早川, 1990)の少なくとも2枚が知られており、それらの年代は層位的にAz-Mipが約25万年前(町田・新井, 2003)、Az-SgP.2は約24万年前(大石, 2009)と推定されている。ここでは、西来ほか(2014)に従い、四阿火山の火山活動史を述べる。この火山の地質図をFig. 7に、噴出物の層序関係をFig. 8に示す。

初期火山体は、“四阿カルデラ”付近を噴出中心として約80万年前に形成を開始した火山体である。約80万年前頃には、米子溶岩層の厚い溶岩流が流出し、主たる山体が形成された。また、それとは独立に田代湖周辺で山体が形成された(小池山溶岩層の活動)。約75万年前には、主たる山体において大谷溶岩層と茨木溶岩類の溶岩流と火砕物が噴出し、さらに、約70万年前には、神川溶岩層、それ以降に四阿溶岩類の溶岩流と火砕物が噴出し、約55万年前まで活動が継続した。

根子岳火山体は、根子岳~菅平高原の緩斜面を形成した火山体である。約70万年前~65万年前に、デイサイト質の六方石溶岩層と根子岳溶岩類の溶岩流と溶結した火砕物が初期火山体の西斜面に噴出し形成された。本火山体は、初期火山体の活動期間中に近接した場所で形成しているが、このデイサイトのRb/Y比は、初期火山体の噴出物と比べて有意に高いことから(Fig. 9)、初期火山体の側火山ではなく別個の火山体として扱われている(西来ほか, 2014)。根子岳火



第7図. a) 四阿火山および鳴岩火山の地質図. 西来ほか(2014)のFig. 2に加筆修正. 略号: Yn, 米子山; Hf, 破風岳; Dn, 土鍋山; Kt, 上砥草山; Mt, 的岩山. b) A-A'地質断面図(西来ほか, 2014). 赤点線は“四阿カルデラ”の縁を示す.
Fig. 7. a) Geological map of Azumaya and Naruiwa volcanoes (modified from fig. 2 in Nishiki et al., 2014). Red dashed line shows the rim of “Azumaya caldera”. Abbreviations: Yn, Yonakoyama; Hf, Hafudake; Dn, Donabeyama; Kt, Kamitokusayama; Mt, Matoiwayama. b) Cross-section along the line A-A' shown on the geological map (Nishiki et al., 2014).



第 8 図. 四阿火山および鳴岩火山の地質層序。西来ほか (2014) の Fig. 3 に加筆修正。テフラ及び火砕流堆積物の年代は、*Kioka et al. (1998), ** 鈴木 (2000), *** 金子ほか (1989), **** 町田・新井 (2003), ***** 大石 (2009) による。溶岩名の略号は第 7 図と同じ。略号: KRP, クリパミス (田辺・上信火山団体研究グループ, 1992); StPm, 里宮パミス (松本盆地団体研究グループ, 2002); KbPm-I, 寒原パミス I (松本盆地団体研究グループ, 2002); KMT, 貝塩上宝テフラ (鈴木, 2000); Az-SgP.2, 菅平第 2 軽石層 (鈴木・早川, 1990)。

Fig. 8. Stratigraphy of Azumaya and Naruiwa volcanoes (modified from fig. 3 in Nishiki et al., 2014). The ages of the tephra and pyroclastic flow deposits are from the following sources: * Kioka et al. (1998), ** Suzuki (2000), *** Kaneko et al. (1989), **** Machida and Arai (2003), and ***** Oishi (2009). Abbreviations of geological units are the same as in Fig. 7. Other abbreviations: KRP, Kuri Pumice (Tanabe and Collaborative Research Group for Jo-Shin Volcanic Terrain, 1992); StPm, Satomiya Pumice (Matsumoto Basin Collaborative Research Group, 2002); KbPm-I, Kambara Pumice I (Matsumoto Basin Collaborative Research Group, 2002); KMT, Kaishio Kamitakara tephra (Suzuki, 2000); Az-SgP.2, Sugadaira Dai2 Pumice bed (Suzuki and Hayakawa, 1990).

山体は、初期火山体よりも早期に活動を停止したにも関わらず、初期火山体と比べて開析が進んでいない (Fig. 7)。この違いについては、根子岳火山体は溶岩や溶結火砕岩で構成される緩斜面からなるのに対し、初期火山体は急峻で溶岩と火砕岩で構成されることから、侵食抵抗性に違いがあったこと、あるいは根子岳火山体と同じ流域 (神川に合流する水系) の四阿溶岩類については開析の程度が小さいことから、水系の違いによる侵食基準面の違いなどがその要因として考えられる (西来ほか, 2014)。

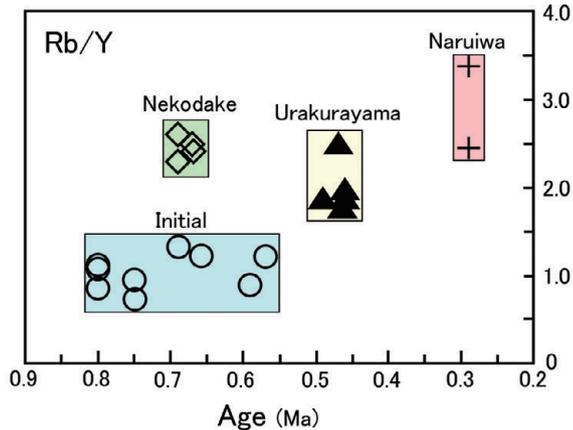
浦倉山火山体は、浦倉山～^{つまごい} 嬬恋高原の緩斜面を形成した火山体である。初期火山体の活動終了後、5 万年程度の活動休止期を挟んだ約 50 万年前に、^{にったさわ} 仁田沢溶岩層や上ノ貝溶岩層が浦倉山付近から東方へ流出した。また、北方へは米子

^{きみょう} 奇妙溶岩類が流出した。約 45 万年前には、浦倉溶岩層が東方へ流出し、浦倉山火山体の活動が終息した。

成層火山体の開析と関連する滝

1. “四阿カルデラ”の地質

“四阿カルデラ”の成因として、爆発的な噴火 (八木, 1941; 荒牧・早川, 1996 など) と崩壊イベント (西来ほか, 2014) があげられているが、いずれの研究でも明瞭な根拠は述べられていない。そこで、その成因を検討するために、カルデラ内およびその周辺の地形と地質の特徴を概観する。太田・片田 (1955) によると、“四阿カルデラ”内の地質は、不動堂溶岩、米子凝灰角礫岩 (四阿火山の噴出物よりも古い火山岩類) および米子溶岩 (四阿火山の噴出物のうち最も古い) からなり、そ



第9図. 四阿火山および鳴岩火山における Rb/Y 比の時間変化. 西来ほか(2014)の Fig. 8 に加筆修正.

Fig. 9. Temporal changes in the Rb/Y ratios of rocks from Azumaya and Naruiwa volcanoes (modified from fig. 8 in Nishiki et al., 2014).

れらを米子奇妙溶岩, 浦倉溶岩, 四阿溶岩, 根子溶岩が取り囲むように覆い, 環状の山頂域を形成している。“四阿カルデラ”内の地質は, 権現沢と大黒沢に沿ってよく露出する。以下, 権現沢流域, 大黒沢流域, 米子鉱山跡～米子林道不動線沿いの地域に区分して, それぞれの地域に露出する地質体の概要を記述する。露頭位置図を Fig. 10 に示す。

権現沢流域: 権現沢の落ち口付近(標高 1,550 m)から標高 1,600 m 付近の権現沢河床には暗青灰色～黒色の斑晶の目立たない緻密な安山岩が断続的に露出する。この安山岩には節理が発達し, それに沿って熱水変質を被っており, 灰白色～黄白色を呈し粘土化している(Fig. 11a)。特に権現沢と登山道が交差する標高 1,580 m 付近の溶岩はいちじるしく変質し, 粘土化している。以上の地質的特徴は, Locs. 1～4 で確認された。

権現沢の標高 1,620 m 付近の左岸の崖には, 層厚 2 m 程度の薄い溶岩層を 2 枚挟む厚い凝灰角礫岩が露出する。凝灰角礫岩には粒径の違いなどによる成層構造が見られる。この露頭の溶岩および凝灰角礫岩は熱水変質を被っておらず, 新鮮な状態を保っている。溶岩層には開口性の亀裂が多数見られる(Fig. 11b)ほか, 凝灰角礫岩中の巨礫にも開口性の亀裂が認められるものが多い(Fig. 11c)。この堆積物は不動沢と権現沢の間にある標高 1,650～1,810 m にかけて広がる緩やかな緩斜面を形成している。以上の地質的特徴は, Loc. 5 で確認された。

権現沢標高 1,655 m 付近の左岸の崖には凝灰角礫岩と層厚 1～3 m ほどの薄い溶岩層との互層が露出する。溶岩層は比較的新鮮な状態を保っているが, 凝灰角礫岩部分を中心に全体的に熱水変質作用を被って白色を呈し粘土化している。また, この露頭の凝灰角礫岩と溶岩層との互層は上流側に大きく傾いている(Fig. 11d)。以上の地質的特徴は, Loc. 7 で確認された。

権現沢の標高 1,730～1,790 m 付近の河床および右岸の

崖には節理が発達する厚い溶岩層が断続的に露出する。節理に沿って 10～100 cm 程度の幅で脈状に熱水変質作用を被って粘土化し, 白色～灰白色を呈する。また標高 1,740 m 付近の右岸の崖では, 開口性の亀裂が発達する部分もある。以上の地質的特徴は, Locs. 10, 11 で確認された。

このほか Locs. 4, 6, 8, 9 では, 安山岩の巨礫を含む凝灰角礫岩が露出し, それらは熱水変質作用を被って粘土化し白色～黄白色を呈することが確認された。これらのうち, Loc. 6 の凝灰角礫岩に含まれる安山岩の巨礫には開口性の亀裂が発達する。

大黒沢流域: 大黒沢と権現沢を結ぶ登山道沿いの標高 1,550 m 付近には, 板状節理の発達する暗青灰色～黒色の斑晶の目立たない緻密な安山岩が露出する。この安山岩は熱水変質を被っておらず新鮮な状態を保っている。大黒沢標高 1,440 m 付近右岸の崖にも同溶岩が新鮮な状態で露出する。以上の地質的特徴は, Locs. 12, 13 で確認された。

大黒沢の標高 1,500～1,600 m の大黒滝付近にかけて, 河床および両岸の崖に露出する地層はいちじるしく熱水変質作用を被り, 粘土化し白色を呈する(Fig. 11e)。米子鉱山の坑口跡の周辺は特に変質が激しく, 侵食が進んでいる。大黒坑付近では変質しているものの弱い成層構造や礫の名残が認められるため, 溶岩ではなく凝灰角礫岩が変質したものと思われる。以上の地質的特徴は, Locs. 14～18 で確認された。また, 大黒沢上流域右岸の標高 1,600 m～1,800 m 付近では新鮮な地すべり地形が確認でき, その滑落崖には熱水変質を被って白色化した部分が見られる(Fig. 11f)。

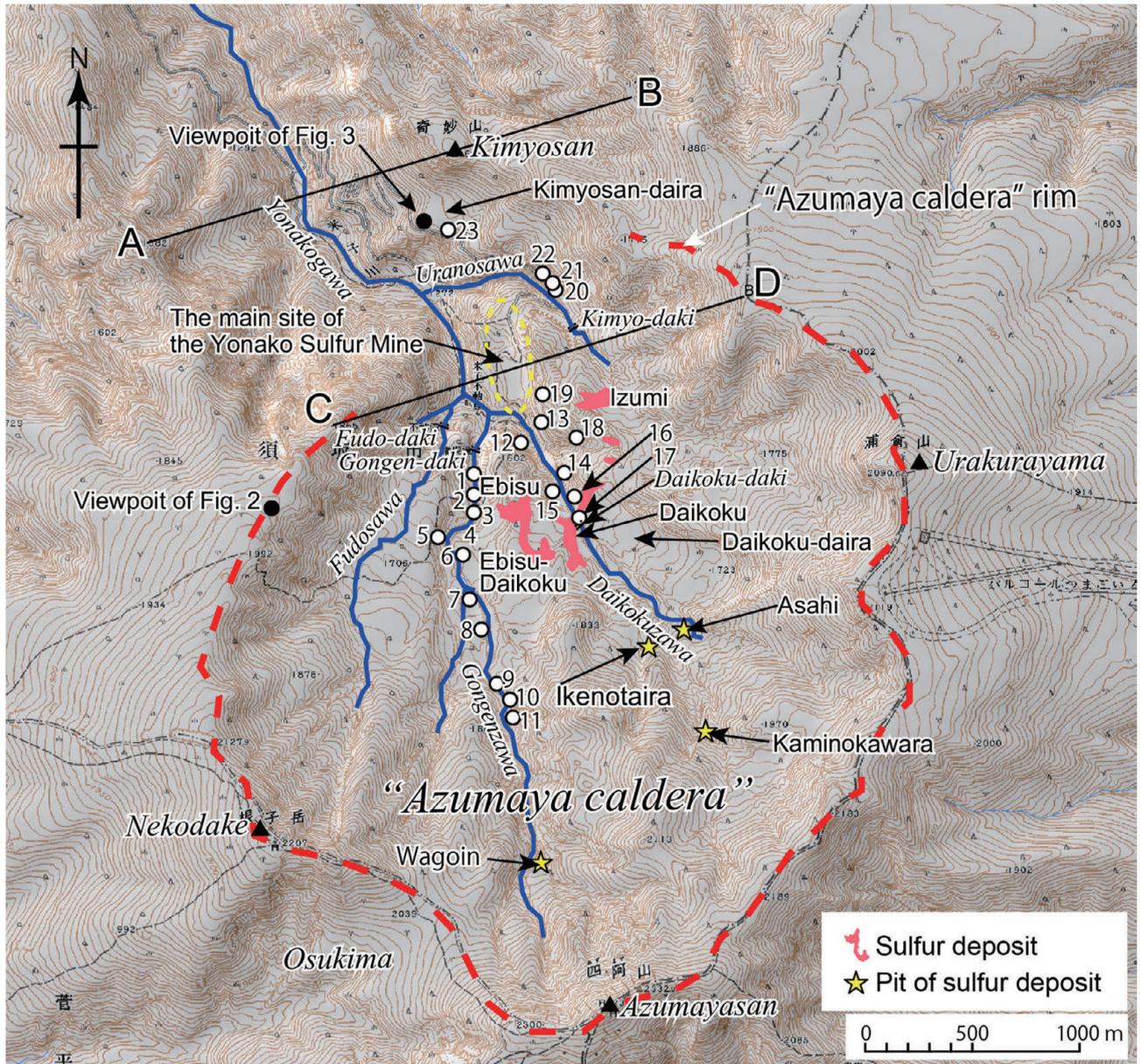
米子硫黄鉱山跡から林道米子不動線沿い: 米子鉱山跡地および鉱山事務所跡地の東側には, 厚さ 50 m 以上の節理が発達する暗青灰色～黒色の緻密な安山岩が急峻な崖を形成している。裏ノ沢にかかる奇妙滝付近にも同溶岩が新鮮な状態で露出する。

裏ノ沢右岸側の林道米子不動線の標高 1,440 m 付近には暗青灰色～灰色の安山岩が断続的に露出する。これらの安山岩は節理に沿って脈状に変質している。変質の脈の幅は数 10 cm～2 m 程度である。以上の地質的特徴は, Locs. 20～22 で確認された。また, 裏ノ沢右岸側の林道米子不動線の標高 1,420 m 付近(Loc. 23)では, いちじるしく亀裂が発達した安山岩の露頭が確認され, その背後には奇妙山平と呼ばれる緩斜面がある。

2. “四阿カルデラ”の成因と形成時期

成層火山の山頂付近において直径数 km に達する凹地の主な成因としては, 山体崩壊にともなう馬蹄形カルデラの形成や大規模な爆発的噴火や地下のマグマの移動にともなう陥没カルデラの形成のほか, 侵食作用による侵食カルデラの形成があげられる。

西来ほか(2014)は, 記載岩石学的特徴に基づき“四阿カルデラ”内に分布する池の平溶岩が浦倉山火山体(約 50～45 万年前)のグループに属すると考え, この火山体の活動をはさんで少なくとも 2 回の崩壊イベントがあった可能性を指摘した。古い方の崩壊イベントでは浦倉山火山体の噴出物の分布から北東側に, 新しい方の崩壊イベントでは現在の米子川



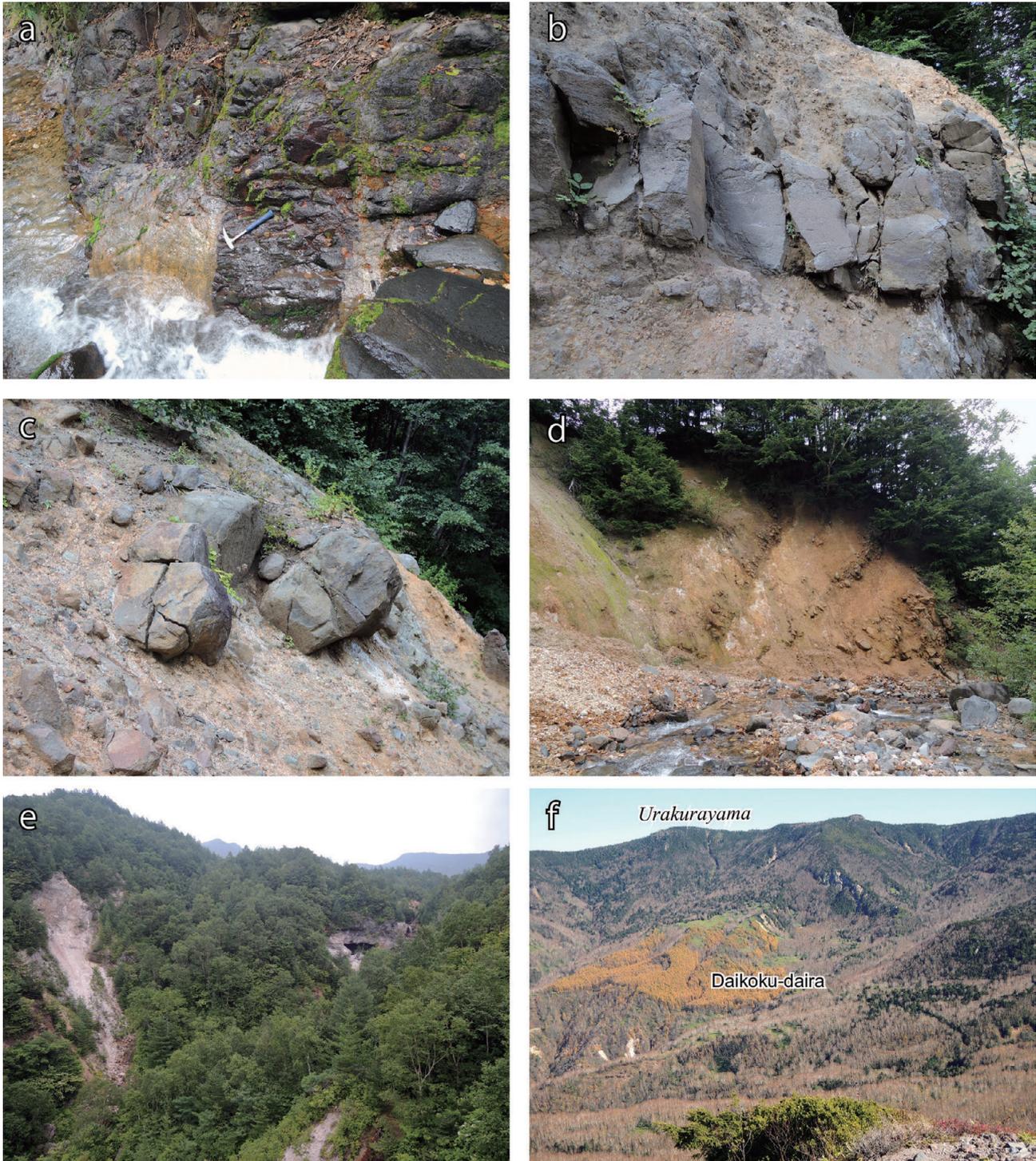
第 10 図. 米子硫黄鉱山の硫黄鉱床と坑道の配置および露頭位置図. 丸印は露頭位置を, ゴチックの数字は露頭番号をそれぞれ示す. 赤点線は“四阿カルデラ”の縁を示す.

Fig. 10. Distribution of sulfur deposits and pits at the Yonako sulfur mine, and locality map of the outcrops referred to. Open circles indicate the locations of outcrops, and each outcrop is numbered. The red dashed line shows the rim of “Azumaya caldera”.

の流れ出る北西側に崩れたと推定した. “四阿カルデラ”が崩壊イベントにともなって形成された地形であるならば, それに対応する岩屑なだけ堆積物が山麓地域に分布するはずである. しかしながら, 本間(1931)以降, 西来ほか(2014)の研究まで, 四阿火山の地質を対象とした多くの研究を精査したが, 岩屑なだけ堆積物に相当する記載は見当たらなかった. 北東麓には浦倉山火山体の噴出物が広く分布するために, すべて覆われている可能性もあり, 古い方の崩壊イベントがなかったとは言い切れないが, 北西側は新しい噴出物に覆われていない. また, 約 30 万年前の鳴岩火山の噴出物が米子川

沿いに残存することから, 崩壊イベントに対応する堆積物がすべて侵食されてしまったとも考えにくい. また, 磐梯火山や雲仙火山の眉山など, 山体崩壊にともなう馬蹄形カルデラの崩壊壁は, 崩壊した方向に開いた形状を呈することが多い. これに対し, 現在の“四阿カルデラ”の縁は丸く閉じた形状を呈する (Figs. 1, 7, 10). これらのことを考え合わせれば, 北東側へ崩れたとされる古い方の崩壊イベントについては現段階では言及できないが, 少なくとも北西側へ崩れる大規模な崩壊イベントは存在しなかった可能性が高い.

また, 西来ほか(2014)が指摘したように, 四阿火山の火



第 11 図. 四阿カルデラ内の代表的な露頭写真. 露頭位置は第 10 図に示す. a) 熱水変質を被った米子溶岩層 (Loc. 2). b) 開口性亀裂が見られる薄い溶岩層 (Loc. 5). c) 開口性亀裂が見られる凝灰角礫岩中の巨礫 (Loc. 5). d) 上流側に傾いた薄い溶岩層と凝灰角礫岩層の互層 (Loc. 7). e) 著しく熱水変質を被った大黒沢沿いの地質体 (Locs. 15~17). f) 大黒沢右岸に見られる新鮮な地すべり地形 (大黒平).

Fig. 11. Photographs of representative outcrops in Azumaya caldera. The locations are shown in Fig. 10. a) Part of the Yonago Lavas altered by hydrothermal activity (Loc. 2). b) Thin lava with many open cracks (Loc. 5). c) Blocks (with many open cracks) in the tuff-breccia (Loc. 5). d) Alternated layers of thin lava and tuff breccia layer, which inclining to the upper stream (Loc. 7). e) Geological body along the Daikokusawsa that has been intensely affected by hydrothermal alteration (Locs. 15–17). f) Fresh landslide topography along the Daikokusawa right bank (Daikoku-daira).

山体を構成する火山岩類は輝石安山岩、かんらん石輝石安山岩および輝石デイサイトであり、Az-Mipのように普通角閃石を多含するものはこれまで記載されていない(太田・片田, 1955; 西来ほか, 2014)。さらに著者らによる地質踏査でも角閃石を含む火山噴出物を“四阿カルデラ”周辺で見つけることはできなかった。Az-Mipの噴出にともない“四阿カルデラ”が形成された(荒牧・早川, 1996)とするには、現状では根拠が乏しいと言わざるを得ない。

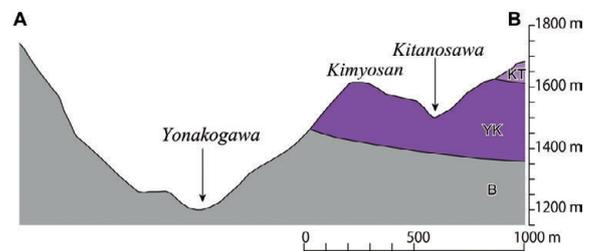
最後に侵食作用について検討する。太田・片田(1955)が明らかにしたように、権現沢、大黒沢沿いを中心に“四阿カルデラ”内の岩石は広く熱水変質作用を被って脆くなっている(Fig. 11a, 11e)。特に大黒沢では変質がいちじるしいために他の沢よりも侵食が進み、不動滝や権現滝などに比べ大黒滝はかなり上流に位置する(Fig. 10)。権現沢では開口性の亀裂が発達する溶岩および凝灰角礫岩(Fig. 11b, 11c)、層理面が上流側に大きく傾いた溶岩と凝灰角礫岩の互層を確認することができる(Fig. 11d)。これらの権現沢沿いに露出する地質体の特徴は、それらが地すべりによって移動したことを示唆している。さらに、大黒沢右岸の1,600~1,850 mにかけて新鮮な地すべり地形が認められる(Fig. 11f)。このような事実は、カルデラ内における侵食と地すべりの活動が現在も活発であることを示している。また、侵食カルデラであると見なされている立山カルデラの崩壊壁は、“四阿カルデラ”の縁と同じように丸く閉じた形状を呈する(原山ほか, 2000; 中野ほか, 2010)。以上のことを考え合わせると、“四阿カルデラ”は、立山カルデラ同様に侵食カルデラと見なすことが现阶段では妥当であろう。しかしながら、近年の研究で三宅島の2000年噴火(Geshi et al., 2002)やカトマイ火山(アラスカ)の1912年噴火(Fierstein and Wilson, 2005)など、地下のマグマの移動にともない陥没カルデラが形成される事例が報告されている。今回はその可能性について検討していないため、“四阿カルデラ”がこの種の陥没カルデラである可能性は否定できない。

さて、“四阿カルデラ”はいつ形成された地形であろうか。太田・片田(1955)は、外輪山を構成する溶岩のうち、浦倉溶岩はカルデラ内に流入し、米子溶岩を直接覆い、硫黄鉱床の近くでも鉱化作用を全く受けていないように観察されるので、かなり新しいもの(更新世の後半)であるとした。浦倉溶岩からは 0.46 ± 0.02 Ma(金子ほか, 1989)と 0.46 ± 0.01 Ma(西来ほか, 2014)のK-Ar年代が報告されている。したがって太田・片田(1955)の指摘が正しいとするならば、“四阿カルデラ”の形成はこの溶岩の流出前、すなわち約46万年以前ということになる。これに対して西来ほか(2014)は、初期火山体、根子岳火山体、浦倉山火山体を構成する溶岩の分布と年代値に基づき、約55~50万年前と45万年前以降に少なくとも2回の崩壊イベントが関与して“四阿カルデラ”(西来ほか(2014)では崩壊地形と表現している)が形成されたと推定した。このように“四阿カルデラ”の形成時期に関しても見解は定まっていない。

米子川右岸の南東-北西方向に伸びる尾根上に米子奇妙溶岩(太田・片田, 1955)が分布する(Figs. 7, 12)。この溶岩

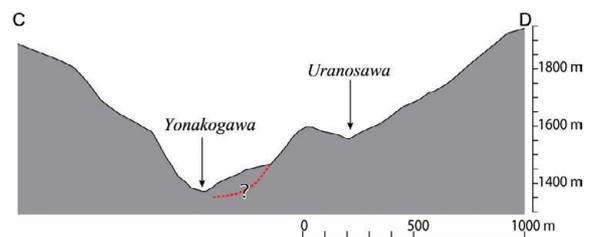


第12図. 米子奇妙溶岩層が構成する尾根。
Fig. 12. Ridge formed by the Yonagokimyo lavas.



第13図. 米子川が形成する谷の地質断面概略図。断面位置は第10図のA-B。略号：KT, 上砥草溶岩層；YK, 米子奇妙溶岩類；B, 基盤岩類。

Fig. 13. Schematic geological cross-section of the valley formed by the Yonakogawa. Cross-section along line A-B, shown on the map in Fig. 10. Abbreviations: KT, Kamitokusa lavas; YK, Yonagokimyo lavas; B, basement rocks.



第14図. 米子硫黄鉱山付近の地すべり地形。断面位置は第10図のC-D。赤点線は推定される地すべり面を示す。

Fig. 14. Topographical cross-section of the landslide near the Yonako sulfur mine. Cross-section along line C-D, shown on the map in Fig. 10. The red dashed line indicates the inferred slip surface.

が噴出する以前の地形は、尾根と谷の位置が現在とは逆で、現在の米子川の部分が尾根、米子奇妙溶岩が分布する尾根が谷であったと考えられる。米子奇妙溶岩からは、 0.46 ± 0.01 MaのK-Ar年代値が得られている(西来ほか, 2014)。したがって、現在の米子川は、約46万年前以降に米子奇妙溶岩の西側の縁に沿って流れるようになったと考えられる。“四阿カ



第15図. 不動滝での最近の米子溶岩層の崩落を示す証拠. a) 米子溶岩層基底部の侵食, b) 崩落した米子溶岩層の岩.
 Fig. 15. Evidence for the recent breakage and collapse of the Yonago lavas at Fudo daki. a) Erosion of the basal part of the Yonago Lavas. b) Collapsed block of the Yonago Lavas.

ルデラ”から流れ出る河川は米子川のみであるから、北西側に開く現在の“四阿カルデラ”は約46万年以降に形成されはじめた地形である可能性が高い。また米子川は、米子奇妙溶岩がつくる地形面に比べ約400mも低い位置を流れている(Fig. 13)。このことから、この川は約46万年間に400m下刻したと考えられ、侵食力が非常に強いことを示している。以上のことをまとめると、“四阿カルデラ”を形成した主な要因は、米子川の強い下方侵食による深い谷の形成と大規模な熱水変質帯における地すべりの相互作用である可能性が高く、その形成は約46万年前以降に始まり、現在でも活発に続いていると考えられる。

地形の断面形態(Fig. 14)や前縁部にいちじくく亀裂が発達した安山岩(米子奇妙溶岩に相当)の露頭が見られることから、米子硫黄鉱山跡地や奇妙山平といった米子川沿いの比較的平坦な地形も地すべりによって形成されたものと考えられる。こうした場所には、鉱山跡や遺跡があることから、人は信仰や産業の場として自然の地形をうまく利用してきたことがうかがわれる。

3. 米子の滝の成り立ち

米子川上流部において、“四阿カルデラ”のほかに特筆される地形として「米子の滝」にかかる約1kmにわたって連続する岩壁がある(Fig. 3)。八木(1941)は、この岩壁のほか、主要なものでは四阿山と根子岳間の^{おおすきま}大隙間と呼ばれる鞍部の岩壁、大谷不動堂の周囲を取り巻く岩壁、大谷不動東部の岩壁は爆裂火口の火口壁であると考えた。さらに、太田・片田(1955)では山頂域を取り巻くように、8つの爆裂火口を図示しており、その中に「米子の滝」にかかる岩壁も含まれている。これらの研究以降、飯島・山岸(1964)や山岸(1988)など多くの研究で八木(1941)と太田・片田(1955)の解釈が採用されており、四阿山山頂域を取り巻く急峻な岩壁は爆裂火口の火口壁であるという考えが浸透したようである。これに対して、小林ほか(2011)では、米子川は火口瀬

より上流で奇妙沢(裏の沢)・不動沢・権現沢・大黒沢と4河川に分岐するが、下流側の比較的侵食に弱い新第三系の堆積岩層に対して、ここで侵食に強い米子溶岩(太田・片田, 1955)の存在が侵食の復活を食い止めて遷急点を形成していると指摘しており、この地形が侵食作用によって形成されたものと推定している。

滝がかかる岩壁が爆裂火口の火口壁であるとする、爆裂火口を形成した噴火は、米子川の河床がほぼ現在の標高まで下がってから、すなわちかなり新しい時代に起きたことになる。そうでなければ、前述のように米子川は強い侵食力を持つために、爆裂火口は侵食により消失してしまうと考えられる。しかし、四阿火山の活動は、多くの溶岩層のK-Ar年代値から約45万年前で終了した可能性が高い(西来ほか, 2014)。仮に約25万年前のAz-Mip(町田・新井, 2003)が四阿火山の噴出物であったとしても、それ以降この火山が活動を継続した形跡は今のところ知られていない。新しい時代の活動であれば、それにとまらぬ堆積物が確認できてよさそうであるが、これまでの研究にも記載がない。以上のことから、新しい時代に爆裂火口を形成する噴火があったとは考えにくく、米子の滝が火口壁にかかる滝である可能性は低い。

爆裂火口の可能性が低く、現在も米子川が活発に下刻していることから、小林ほか(2011)が推定したように、現在見られる米子の滝は侵食作用により形成された地形であり、米子溶岩最下部の厚い溶岩層(不動滝溶岩: 太田・片田, 1955)が侵食に対して強い抵抗力をもつために、大規模な岩壁が形成されたのであろう。不動滝溶岩は柱状節理の発達する緻密な安山岩で、米子凝灰角礫岩を覆っている。溶岩に比べ米子凝灰角礫岩の方が侵食に弱いため、現在の滝にも凝灰角礫岩がえぐられて溶岩層がオーバーハングする様子が見られる(Fig. 15a)。小林ほか(2011)が指摘したように、この差別侵食により滝の基部の侵食が進むと、やがて上部の溶岩が節理に沿って崩落し、滝は徐々に後退していくのであろう。こ

れを裏付けるように、不動滝の下流側には過去に崩落した溶岩の巨大な岩塊が見られる (Fig. 15b).

以上のことをまとめると、米子の滝の形成過程は次のようになると考えられる。①約46万年前に古い谷地形を米子奇妙溶岩が流下し埋め立てる。②この溶岩の西側の縁に沿って侵食がはじまり、米子川ができはじめ、旺盛な侵食力により下刻が進む。③侵食が不動滝溶岩まで達し、滝の形成がはじまる。④差別侵食による溶岩の崩落により現在の位置まで滝が後退し、現在見られるような不動滝、権現滝がかかる巨大な岩壁が形成された。

米子硫黄鉱山と坑排水

1. 米子硫黄鉱山の概略

米子硫黄鉱山の歴史と地質については、太田・片田(1955)と齋藤(2012)に詳しくまとめられている。ここでは、この2つの研究に基づき米子硫黄鉱山の概略を紹介する。

米子硫黄鉱山の主要な鉱床は、大黒滝周辺を中心として権現沢と裏ノ沢にはさまれた東西600m、南北1,000mの地域に分布し (Fig. 10)、不動滝溶岩(米子溶岩の最下部を構成する厚い溶岩層：太田・片田, 1955)の最上部付近のほぼ同一層準に賦存する。エビス、エビス大黒、大黒、泉などの主要な鉱床のほかに、「四阿カルデラ」内には旭坑、池ノ平坑、上ノ河原坑、和合院坑の鉱床がある。鉱体の主要部は、熱水変質作用により蛋白石化した緻密もしくは多孔質の安山岩中に鉱染状に遊離硫黄が交代したものであり、鉱体内の品位分布は不規則である。鉱体主要部の外縁部には「鷹ノ目」と呼ばれる硫黄結晶の大きな塊(3~200cm)が斑状に含まれている。

米子硫黄鉱山の採掘の歴史は、古く寛永年間(1624-1643年)の硫黄山稼ぎに関する資料にさかのぼる。近江の治兵衛という人物がはじめて硫黄の採掘を請負って以来、幕末まで(たきがしら たいこく さわば いすみ わごういん えびす たかのめ)滝頭・大黒・沢場・泉・和合院・恵美須および屋源田の7地区で稼業されたようであるが、いずれも小規模で断続的であったらしい。明治以降は企業組織の鉱山会社によって近代化された採鉱法や精錬法が取り入れられ、大規模に稼行された。数代の経営者を経て、1936(昭和11)年に中外鉱業株式会社による稼行がはじまり、経営は安定し生産量が飛躍的に増した。最盛期の1937(昭和12)~1942(昭和17)年にかけては、年間の硫黄生産量が1万tを超えていた。その後、1944(昭和19)年から戦時下の硫黄鉱山の企業整備のため帝国鉱業株式会社に譲渡されるも、1950(昭和25)年に再び中外鉱業株式会社により稼業されることになる。しかし、原油の精製工程で回収される硫黄に押され、1960(昭和35)年に採掘を打ち切り、硫黄鉱山は閉山した。

2. 廃坑から流出する酸性水

四阿火山の西麓、長野盆地東部に位置する須坂・上高井地域(須高地区)では、河東山地から千曲川に流入する複数の水系の酸性水対策が課題になっている。須高地区はいわゆる「酸川」の集中域で、米子川とその下流の百々川、松川などの河川水は強い酸性(pH 3~4)を示す(河野ほか, 1986)。酸性河川が生じる基本的な原因は、上流域に豊富に存在する硫



第16図. 須坂市臥竜(Stop 1)から望む長野盆地(善光寺平)と西山(水内丘陵).

Fig. 16. Photograph of the Nagano Basin (Zenkoji Daira) and Nishiyama Mountains (Minochi Hills), viewed from Garyu, Suzaka City (Stop 1).

化物が大気に触れて酸化され、水による溶解とともに多量の硫酸イオンが河川に流出するためと考えられる。その際、硫黄と結合していた金属イオンも水に溶解することから、酸性河川水は重金属を含む有害な水質となる。したがってこのような酸性河川には魚類が生息せず、下流域における水利用は大きく制限され、農業被害や健康被害をもたらすことにもなる。星加ほか(1984)によれば、須高地区の酸性河川水中の硫酸イオンの濃度は最高160ppmで、わが国の河川水中の硫酸イオン濃度の平均値10.9ppmの約16倍に達する。また酸性河川となった要因には、もともと地質に由来する自然的要因と、かつて硫黄等を採掘した休廃止鉱山の抗廃水に由来する人為的要因の両方がある。米子川水系の50地点についておこなった水質調査結果をもとに、河野ほか(1990)が主たる負荷源について検討した結果では、人為的要因に起因する SO_4^{2-} の負荷割合が6割前後と試算されるとともに、自然要因と人為的要因との影響割合は支流の沢ごとにも異なるとしている。

須高地区の主な休廃止鉱山としては、百々川水系の米子川上流にある米子鉱山のほか、松川上流の横手山鉱山、松川水系の樋沢川上流の小串鉱山などがある。長野県はこれらの休廃止鉱山対策として、昭和57年度から平成8年にかけて小串鉱山跡地、米子鉱山跡地および横手山跡地の覆土、排水および緑化工事等を実施している。しかし、昭和59年から29年間にわたり須高地区の松川および百々川水系の5地点で継続して行われている水質調査の結果では、酸性河川の水質変動の傾向にほとんど変化がなく、河川水がpH 5前後ないし4以下の値を示す状況は改善していない(長野県環境保全研究所, 2013)。

見学地点

Stop 1 須坂市野辺臥竜橋(百々川)：四阿火山周辺の地形・地質

[地形図] 1：25,000「須坂」

[位置]36°38'18"N, 138°18'59"E

[解説]見学地点は百々川下流の後期更新世の扇状地上に位置しており、橋の上から長野盆地と西山(水内丘陵)を眺望することができる(Fig. 16). 長野盆地周辺の大きな地形の特徴を観察するとともに、盆地をはさんだ東西の山地の特徴の違いやそれぞれの成り立ちなどについて概略を説明する。

Stop 2 不動滝：米子溶岩と米子凝灰角礫岩

[地形図]1:25,000「四阿山」

[位置]36°34'5"N, 138°24'16"E

[解説]不動滝では、四阿火山の最初期の噴出物である米子溶岩とその下位の米子凝灰角礫岩を観察する。

米子溶岩(太田・片田, 1955)は、主に“四阿カルデラ”内に分布する溶岩とそれに伴う同質の火砕岩である。見学地点では柱状節理の発達した層厚 50 m 以上の溶岩がみられ、基盤岩類の米子凝灰角礫岩を直接覆う。太田・片田(1955)はこの厚い溶岩を不動滝溶岩と呼び、それより上位の部分と区分している。岩質は単斜輝石含有斜方輝石デイサイトで、本溶岩層から 0.75 ± 0.05 Ma(内海ほか, 1998), 0.77 ± 0.04 Ma(西来ほか, 2014)という K-Ar 年代が報告されている。

Stop 3 不動寺裏の登山道：権現滝の遠望

[地形図]1:25,000「四阿山」

[位置]36°34'5"N, 138°24'21"E

[解説]展望台より落差約 75 m の権現滝を遠望する。この滝も不動滝と同一の溶岩にかかっている。初夏には新緑と、秋には紅葉とともに美しく彩られた滝を眺めることができる。権現滝より上流では、熱水変質作用を被って白く粘土化した米子溶岩が露出する。この地点から下り、登山道が権現沢を横切る地点では、成層構造の見られる米子凝灰角礫岩層を観察することができる。

Stop 4 大黒沢・権現沢間の登山道：“四阿カルデラ”と地すべり地形

[地形図]1:25,000「四阿山」

[位置]36°34'2"N, 138°24'26"E

[解説]浦倉山、四阿山などを含む環状の山稜に囲まれた“四阿カルデラ”の地形および大黒沢右岸の地すべり地形を観察する。大黒沢右岸の地すべり地形は、高さ約 100 m、幅約 300 m の滑落崖とその下に広がる平坦な地形で構成される。滑落崖には点々と熱水変質により白色化した部分が見られる。この平坦な地形は、米子硫黄鉱山時代には大黒平と呼ばれ、褐鉄鉱の採取場のほか社宅や火薬庫があった(齋藤, 2012)。落葉した晩秋には、この地点から大黒坑道の入り口も眺めることができる。米子硫黄鉱山として開発された一帯は植林され、現在はカラマツ林になっている。

Stop 5 権現沢：熱水変質帯と廃坑跡から流出する酸性水

[地形図]1:25,000「四阿山」

[位置]36°33'56"N, 138°24'22"E

[解説]根子岳に向かう登山道が、権現滝の上で権現沢を渡



第 17 図. Loc. 3 における湧水の写真。露頭位置は第 10 図に示す。

Fig. 17. Photograph of spring water at Loc. 3. The location is shown in Fig. 10.

第 1 表. 権現沢上流 1590 m 右岸(Loc. 3)における湧水の水質検査結果。

Table 1. Results of an analysis of the spring water on the Gongensawa right bank, 1590 m above sea level (Loc. 3, shown in Fig. 10).

pH	EC (mS/m)	instrument
3.0	70.0	portable EC/pH meter (WM-32EP)

る地点である(Loc. 3)。河床部の熱水変質を受けた火山岩の露頭と、廃鉱山の痕跡を観察する。ここでは、毎分数十リットル規模の湧水があり、それが沢に流入している様子が観察できる(Fig. 17)。周辺の状況とその流出形態から、おそらくはかつての鉱山の坑道内からの排水跡と考えられる。2014年10月17日に調査した際には、湧水は無色透明で、水温は 8.3°C であった。また、流路沿いには酸性水に耐性をもつと思われる緑色の苔類の繁殖もみられた。この湧水を採水し、室内で行った水質検査結果では、pH 3.0 の値が得られた(Table 1)。

Stop 6 米子鉱山精錬所跡：硫黄鉱床と米子大瀑布遠望

[地形図]1:25,000「四阿山」

[位置]36°34'16"N, 138°24'23"E

[解説]米子大瀑布もしくは米子の滝と呼ばれる不動滝と権現滝を一望することができる。また、その反対側の岩壁には泉坑と呼ばれた硫黄鉱床が見られ、そこから崩落した硫黄鉱石の転石も観察することができる。岩壁を構成する厚い溶岩(不動滝溶岩：太田・片田, 1955)では節理に沿って幅数 m ほどの部分が白色に変質しているのみであるが、それを覆う凝灰角礫岩層は広い範囲が白色に変質している。鉱山の最盛期である 1941(昭和 16 年)ごろには精錬用焼取炉 28 基の煙突が林立していた(齋藤, 2012)。米子硫黄鉱山跡および不

動滝、権現滝の一带は、滝や植生といった美しい自然景観だけでなく山岳修験の場としての景観も備えており、良好な風致の維持を図る必要性の高い地区であるとみなされ、2010年に上信越高原国立公園の第2種特別地域に指定された。

Stop 7 米子硫黄鉱元山事務所跡：四阿カルデラと米子溶岩

[地形図] 1:25,000「四阿山」

[位置] 36°34'22"N, 138°24'24"E

[解説] “四阿カルデラ”や不動滝溶岩のつくる岩壁といった成層火山体の開析によって生み出された壮大な自然景観だけでなく、精錬所跡や大黒沢といった米子硫黄鉱山跡を一望することができる。この場所には鉱業所の所長や採鉱課長をはじめとする会社の幹部や労務係や庶務係などが常駐する鉱山事務所があった。そのほかにも仁礼小学校・米子分教場や青年学校、診療所、合宿所、映画館などの施設が設けられていた(齋藤, 2012)。

謝 辞

権現沢に流入する湧水の水質については、長野県環境保全研究所の小澤秀明氏に水質検査をしていただき、関連する文献を紹介していただいた。査読者の富山大学の石崎泰准教授ならびに産業技術総合研究所の石塚吉浩博士、担当編集委員の大藤 茂教授のご指摘とご助言により内容が大きく改善された。以上の方々により感謝申し上げます。

文 献

- 赤羽貞幸・竹下欣宏(Akahane, S. and Takeshita, Y.), 2011, 第2章 大地のなりたち—地質—。須坂市誌 第1巻 自然編(*The History of Suzaka City, Vol.1 Natural History*), 89–152.
- 荒牧重雄・早川由紀夫(Aramaki, S. and Hayakawa, Y.), 1996, 四阿火山, 新版 地学事典(*Cyclopedia of Earth Sciences*), 平凡社(Heibonsha Ltd.), 22.
- Fierstein, J., and Wilson, 2005, Assembling an ignimbrite: Compositionally defined eruptive packages in the 1912 Valley of Ten Thousand Smokes, Alaska. *Geol. Soc. Amer. Bull.* **117**, 1094–1107.
- Geshi N., Shimano T., Chiba T., Nakada S., 2002, Caldera collapse during the 2000 eruption of Miyakejima volcano, Japan. *Bull. Volcanol.* **64**, 55–68.
- 原山 智・高橋 浩・中野 俊・菊谷愛彦・駒澤正夫(Harayama, S., Takahashi, Y., Nakano, S., Kariya, Y. and Komazawa, M.), 2000, 立山地域の地質。地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)(*Geology of the Tateyama District. With Geological Sheet Map at 1: 50,000*), 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 218p.
- 早津賢二(Hayatsu, K.), 2008, 妙高火山群—多世代火山のライフストーリー—。(*Myoko Volcanoes*), 実業広報社(Jitsugyo-koho Co., Ltd.), 421p.
- 星加安之・小山 裕・奥山周作・五味—エリーザ—エリカ・村山忍三(Hoshika, Y., Koyama, Y., Okuyama, S., Gomi, E. E. and Murayama, N.), 1984, 硫黄廃鉱下流における水資源の保全と健康の保護に関する研究(第一報)—長野県須高地方における硫黄廃鉱からの酸性河川水中金属イオンおよび陰イオンの分析—。信州大学環境科学論集(*Bull. Environ. Conserv., Shinshu Univ.*), no. 6, 51–55.
- 本間不二男(Honma, F.), 1931, 中部信濃地質誌(*Geology of the Central Part of Shinano*)*. 信濃教育会小県上田部会(Chiisagata Ueda Subcommittee, Shinano Education. Board)*, 191p.
- 飯島南海夫・山岸猪久馬(Iijima, N. and Yamagishi, I.), 1963, 四

- 阿火山群, 上田小県誌 第四巻 自然編(*The History of Magazine of Ueda-Chiisagata Region*), 179–181.
- 金子隆之・清水 智・板谷徹丸(Kaneko, T. Shimizu, S. and Itaya, T.), 1989, K–Ar年代からみた信越高原地域の火山活動。岩鉱(*Jour. Mineral. Petrol. Econ. Geol.*), **84**, 211–225.
- 加藤碩一・赤羽貞幸(Kato, H. and Akahane, S.), 1986, 長野地域の地質。地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)(*Geology of the Nagano District. With Geological Sheet Map at 1: 50,000*), 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 120p.
- Kioka, H., Furuyama, K., Miyake, Y., Sakai, J., Nagao, K., Ike-moto, M., Noiri, H. and Oda, K., 1998, K–Ar chronology of the Middle Pleistocene lavas at Ontake volcano, central Japan. *Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*, **52**, 464–474.
- 河野行雄・関 久人・宮島 勲(Kono, Y. Seki, H. and Miyajima, I.), 1986, 須高地方酸性河川の水質特性。長野県衛生公害研究所研究報告(*Bull. Nagano Res. Inst. Health Pollut.*), **9**, 11–17.
- 河野行雄・原田 勉・村松紘一・樋口澄男・近藤君夫・桑原秀明(Kohno, Y. Harada, T. Muramatsu, K. Higuchi, S. Kondo, K., and Kuwabara, H.), 1990, 米子川水系の水質特性。長野県衛生公害研究所研究報告(*Bull. Nagano Res. Inst. Health Pollut.*), **13**, 7–12.
- 小林 詢・渡辺敏泰・廣内大助(Kobayashi, M. Watanabe, T. Hirouchi, D.), 2011, 第1章 ふるさとの生活舞台—地形—。須坂市誌 第1巻 自然編(*The History of Suzaka City, Vol.1 Natural History*), 49–88.
- 町田 洋・新井房夫(Machida, H. and Arai, H.), 2003, 新編火山灰アトラス(*Atlas of Tephra in and around Japan*). 東京大学出版会(Univ. Tokyo Press), 336p.
- 松本盆地団体研究グループ(Matsumoto Basin Collaborative Research Group), 2002, 古期御岳火山の地質。地球科学(*Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*), **56**, 65–85.
- 宮澤慶男(Miyazawa, Y.), 2014, 第1編 旧市町村別の地区史 第八章 仁礼地区。須坂市誌 第2巻 地史・民俗編(*The History of Suzaka City, Vol.2 Geohistory and Folklore*), 259–290.
- 中野 俊・竹内圭史・加藤碩一・酒井 彰・浜崎聡志・広島俊男・駒沢正夫(Nakano, S., Takeuchi, K., Kato, S., Sakai, A., Hamasaki, S., Hiroshima, T. and Komazawa, M.), 1998, 20万分の1地質図幅「長野」(*Geological Map of Japan 1: 200,000, Nagano*). 地質調査所(Geol. Surv. Japan).
- 中野 俊・奥野 充・菊川 茂(Nakano, S., Okuno M. and Kikukawa S.), 2010, 立山火山。日本地質学会第117年学術大会旅行見学旅行案内書(*Excursion Guidebook 117th Ann. Meet. Geol. Soc. Japan*), 地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **116**, 補遺(Supplement), 37–48.
- 中野 俊・西来邦章・宝田晋治・星住英夫・石塚吉浩・伊藤順一・川邊 久・及川輝樹・古川竜太・下司信夫・石塚 治・山元孝広・岸本清行(Nakano, S., Nishiki, K., Takarada, S., Hoshizumi, H., Ishizuka, Y., Itoh, J., Kawanabe, S., Oikawa, T., Furukawa, R., Geshi, N., Ishizuka, O., Yamamoto, T. and Kisimoto, K.), 2013, 日本の火山(第3版)。200万分の1地質編集図(1: 2,000,000 MAP SERIES, *Volcanoes of Japan (Third Edition)*), No.11, 地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan, AIST).
- 長野県環境保全研究所(Nagano Nature Conservation Research Institute), 2013, 2 須高地区酸性水対策調査。長野県環境保全研究所業務年報(*Ann. Rep. NECRD*), **9**, 7.
- 長森英明・古川竜太・早津賢二(Nagamori, H., Furukawa, R. and Hayatsu, K.), 2003, 戸隠地域の地質。地域地質研究報告(5万分の1地質図幅)(*Geology of the Togakushi District. With Geological Sheet Map at 1: 50,000*), 産総研地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan, AIST), 109p.
- 西来邦章・竹下欣宏・田辺智隆・松本哲一(Nishiki, K., Takeshita, Y., Tanabe, T. and Matsumoto, A.), 2014, 中部日本, 四阿火山のK–Ar年代：四阿火山の火山活動史の再検討。地質雑(*Jour. Geol. Soc. Japan*), **120**, 89–103.
- 大石雅之(Oishi, M.), 2009, 四阿火山を起源とする噴出物の岩石記載的特徴とテフラ分布。地学雑(*Jour. Tokyo Soc. Geogr.*), **118**, 1237–1246.

- 太田良平・片田正人(Ota, R. and Katada, M.), 1955, 5万分の1地質図幅「須坂」及び同説明書(*Geology of the Suzaka District. With Geological Sheet Map at 1: 50,000*), 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 75p.
- 齋藤保人(Saito, Y.), 2012, 米子硫黄鉱山史(*History of Yonako Sulfur Mine*). 筑北炭田(西条炭)採掘史研究会(Chikuhoku Tanden(Nishijotan) Saikutsushi Kenkyukai), 258p.
- 塩野入忠雄(Shionoiri, T.), 1983, 菅平高原地方の地質—四阿火山・烏帽子火山群(*Geology of the Sugadaira Highland: Azumaya Volcano and Eboshi Volcano Group*)*. 銀河書房(Ginga Shobo), 127p.
- 鈴木毅彦(Suzuki, T.), 2000, 飛騨山脈貝塩給源火道起源の貝塩上宝テフラを用いた中期更新世前半の地形面編年. 地理評(*Geogr. Rev. Japan*), 73, 1–25.
- 鈴木毅彦・早川由紀夫(Suzuki, T. and Hayakawa, Y.), 1990, 中期更新世に噴出した大町 Apm テフラ群の層位と年代. 第四紀研究(*Quatern. Res.*), 29, 105–120.
- 田辺智隆・上信火山団体研究グループ(Tanabe, T. and Collaborative Research Group for Jo-Shin Volcanic Terrain), 1992, 菅平から嬭恋高原にかけて分布する中部更新統. 第四紀(Quatern. (*Daiyonki*)), no. 25, 47–56.
- 嬭恋村誌編集委員会編(Tsumagoi Ed.), 1977, 嬭恋村誌 上巻(*The History of Tsumagoi Village, vol.1*), 嬭恋村誌編集委員会(Tsumagoi Ed.), 1154p.
- 内海 茂・中野 俊・宇都浩三(Uchiumi, S., Nakano, S. and Uto, K.), 1998, 20万分の1地質図幅「長野」地域の年代未詳岩石のK–Ar年代. 地調月報(*Bull. Geol. Surv. Japan*), 49, 189–193.
- 八木貞助(Yagi, T.), 1941, 上高井地質誌(*Regional Geology of Kamitakai*). 上高井教育会(Kamitakai Education Board)*, 230p.
- 矢口裕之・田辺智隆(Yaguchi, H. and Tanabe, T.), 1990, 群馬県北部に分布する中期更新世の火山灰層. 日本第四紀学会講演要旨集(*Quatern. Soc. Japan, Abstr.*), 20, 120–121.
- 山岸猪久馬(Yamagishi, I.), 1988, 第5章 火山 5.4 那須火山体南端部の火山 (2) 四阿火山, 日本の地質4 中部地方I(*Regional Geology of Japan, Part 4 Chubu I*), 共立出版(Kyoritsu Shuppan), 204.
- [URL1] 新版長野県地質図作成委員会編(Editorial Committee of New Geological Map of Nagano Prefecture), 2010, 新版長野県地質図 ver.1. <http://www.pref.nagano.lg.jp/kanken/chosa/kenkyu/chishitsu/chishitsuzu.html>

*English translation from the original written in Japanese

著者プロフィール



竹下欣宏 信州大学学術研究院教育学系准教授。99年 信州大学理学部卒, 04年 信州大学大学院工学系研究科博士後期課程修了(理学博士), 04年 栃木県立博物館学芸嘱託員, 08年 戸隠地質化石博物館専門員, 10年 信州大学教育学部助教, 12年から現職。研究内容: 火山灰層序に基づく地形・地質発達史の解明。本研究では, 現地調査・総括・原稿執筆・編集委員会との対応を担当。E-mail : takey@shinshu-u.ac.jp



西来邦章 原子力規制委員会原子力規制庁技術研究調査官。01年 信州大学理学部卒, 07年 信州大学大学院工学系研究科博士後期課程修了 博士(理学), 08年 産業技術総合研究所特別研究員, 13年 産業技術総合研究所テーマ型任期付研究員, 15年から現職。研究内容: 火山活動変遷史からみた新生代の地質構造発達史の解明。本研究では, 現地調査・原稿執筆(四阿火山の活動史)を担当。E-mail : kuniaki_nishiki@nsr.go.jp



富樫 均 長野県環境保全研究所自然環境部専門研究員。信州大学理学部卒, 85年 同大学院修了(地質学専攻, 理学修士), 建設コンサルタントを経て96年長野県自然保護研究所(現職の前身)に入所, 技術士(応用理学部門, 環境地質学)。長野県による新版長野県地質図作成事業では幹事長を務める。研究内容: 地形地質発達と暮らしとの関わり。本研究では, 現地調査・原稿執筆(地形地質概説・廃坑の坑排水)を担当。E-mail : togashi-hitoshi@pref.nagano.lg.jp

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

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

一般社団法人日本地質学会