

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

K–Ar ages for lavas of Azumaya volcano, central Japan: Reexamination of volcanic history of Azumaya volcano

Abstract

西来邦章* 竹下欣宏**
田辺智隆*** 松本哲一*

Kuniaki Nishiki*, Yoshihiro Takeshita**,
Tomotaka Tanabe*** and
Akikazu Matsumoto*

2013年11月5日受付.

2014年2月3日受理.

* 産業技術総合研究所地質情報研究部門
Institute of Geology and Geoinformation,
Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba
Central 7, 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki,
305-8567, Japan

** 信州大学教育学部
Faculty of Education, Shinshu University,
6-ro, Nishinagano, Nagano, 380-8544, Japan

*** 戸隠地質化石博物館
Togakushi Museum of Natural History, 3400,
Tochihara, Togakushi, Nagano, 381-4104, Japan

Corresponding author: K. Nishiki,
k-nishiki@aist.go.jp

We determined K–Ar ages and whole-rock chemistry for volcanic rocks from Azumaya volcano and the surrounding area of central Japan, in order to reexamine its volcanic history. Based on our chronological and petrological study, coupled with previous geological data, we reconstructed the volcanic history of the volcano. The volcano consists of three volcanic edifices (the Initial volcanic edifice, the Nekodake volcanic edifice, and the Urakurayama volcanic edifice). Volcanic activity started at ~0.8 Ma, forming the Initial volcanic edifice, which consists mainly of dacitic and basaltic andesitic lavas. At ~0.7 Ma, dacitic volcanic activity started around Nekodake and formed the Nekodake volcanic edifice within several tens of thousands of years. Activity of the Initial volcanic edifice ceased at ~0.55 Ma. After a dormant period of approximately 50,000 years, andesitic lavas effused from the eastern slope of the Initial volcanic edifice at ~0.5 Ma, forming the Urakurayama volcanic edifice and ceasing at ~0.45 Ma. Subsequently, a small volcano (Naruiwa volcano) erupted in the northwestern region of the Azumaya volcano at ~0.3 Ma.

Keywords: Azumaya volcano, volcanostratigraphy, K–Ar dating, Quaternary, Nagano and Gunma Prefecture

はじめに

東北日本弧と伊豆ボニン弧が会合する中部日本は、背弧側まで数多くの第四紀火山が分布しており (Fig. 1a), 約100万年前以降に活動を開始した火山が多く認められる (金子ほか, 1989; 三宅, 2006). 本研究の対象とする四阿火山は、火山フロントの屈曲部付近に位置する複成火山である。山頂域には浦倉山 (2091 m) ~ 四阿山 (2354 m) ~ 根子岳 (2207 m) と連なる稜線を縁とする、かつて太田・片田 (1955) にカルデラとされた環状の崩壊地形 (直径約 3 km) が発達する (Fig. 1b). 四阿火山の西~北麓は、標高の高い地点まで基盤岩が露出しており、噴出物の分布が限定的であるが、根子岳を頂点とする南西麓および浦倉山を頂点とする東麓は、緩やかな火山山麓扇状地を形成している。四阿火山では、八木 (1941), 太田・片田 (1955) などによる層序学的研究、金子ほか (1989), 内海ほか (1998) などによる年代学的研究が行われている。しかしながら、詳細な火山活動史を復元できるほど十分な年代データ量はなく、さらに、侵食の程度や岩質の異なる火山岩が同一の地質ユニットに含まれていることから層序学的に検討の余地がある。そこで本研究では、四阿火山の活動時期を確定することに主眼を置き、山頂域を構成

する地質ユニットを主な対象として地質調査を行い、K–Ar年代測定および全岩化学組成分析を実施した。その結果、四阿火山は3つの成層火山体から構成されること、また、米子川下流域の米子不動里宮付近に分布する火山岩は、四阿火山とは異なる別の第四紀火山体 (鳴岩火山) と解釈できることが明らかになったので、ここに報告する。

四阿火山および鳴岩火山の地質

四阿火山および鳴岩火山の基盤岩類は、新第三系の内村層上部に相当する緑色火山岩類および堆積岩類、鮮新世火山岩類および新第三系貫入岩類で、周辺地域には御飯火山、草津白根火山、浅間・烏帽子火山群起源の第四紀火山噴出物が分布する (Fig. 2).

八木 (1941) は、四阿山周辺に分布する火山地形および火山岩を四阿火山、浦倉火山、米子奇妙火山とし、これらを一括して四阿火山群とした。そして、これらを構成する噴出物を13の地質ユニットに区分した。その後、太田・片田 (1955) は、四阿火山群を単一の火山体として四阿火山とし、16の地質ユニットに細区分した。しかし、後述するように、太田・片田 (1955) が根子溶岩および四阿溶岩とした地質ユニットには岩質、年代、化学組成が異なるものが含まれる。

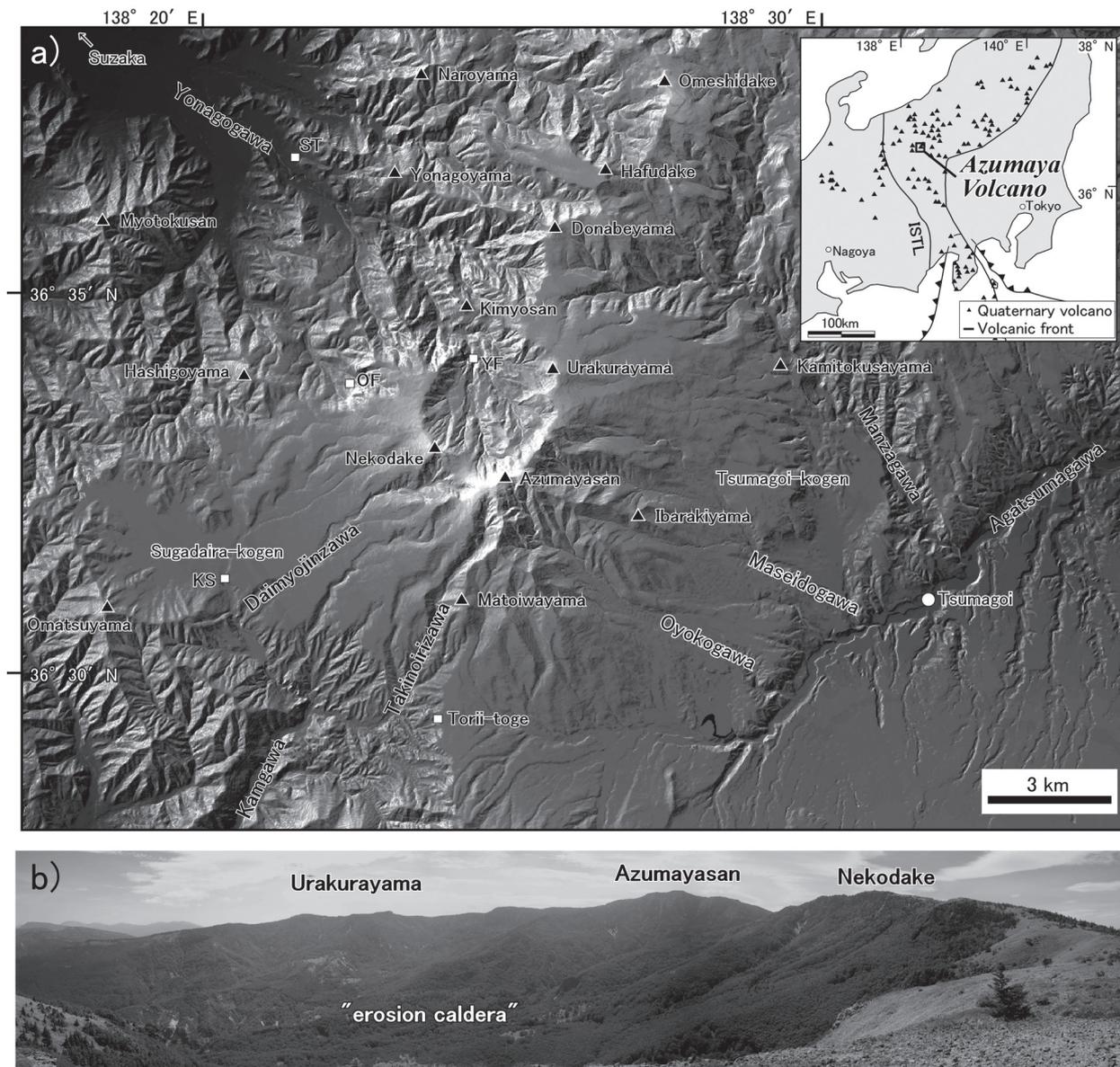


Fig. 1. a) Index and relief map of Azumaya volcano and surrounding area. Distribution of Quaternary volcanoes is after Nakano et al. (2013). Abbreviations: ST, Yonago-fudo-satomiya; YF, Yonago-fudosen; OF, Otani-fudosen; KS, Karasawa fall. The relief map was created using GISMAP (10 m mesh digital elevation data) released by Hokkaido Chizu Co. Ltd. b) Photograph of the erosion caldera in Azumaya volcano, viewed from north of Nekomadake.

また、太田・片田(1955)では、複数の細分可能な溶岩と火砕岩を一括した地質ユニットについてもすべて***溶岩と呼称している。そのため、本研究では太田・片田(1955)の地層名を踏襲したうえで地質ユニットの分類名を、1枚の溶岩で構成されるものについては***溶岩(lava)、複数枚の同質の溶岩とそれに付随する火砕岩で構成されるものについては***溶岩層(lavas)、溶岩と溶結火砕岩が累重するが主に溶岩流で構成されるもの、あるいは複数の同質~類質の溶岩と火砕岩の互層で構成され細分可能な地質ユニットを一括したものについては溶岩類(lavas)に改称する。また、新たに実施した地質調査の結果、太田・片田(1955)が示した地質ユニットの分布域を改訂したものについては太田・片

田、1955命名と記し、再区分が必要となった地質ユニットについては新称を用いた。

太田・片田(1955)は、米子川下流域にある米子不動里宮の北西方約2 km付近に分布する溶結凝灰岩を蓑堂溶岩と命名し四阿火山の噴出物に含めたが、山頂域ではそれに対比される地質ユニットは見出されていない。一方、早津・河内(1997)は、長野盆地東縁部に分散して分布する溶結凝灰岩を柴溶結凝灰岩体(早津・河内, 1997)と命名し、蓑堂溶岩(溶結凝灰岩)を本岩体しほに含めた。そして、皆神火山みなかみ北西方に分布する本岩体から、 2.43 ± 0.11 Ma、 2.43 ± 0.10 Ma という K-Ar 年代を報告している。蓑堂溶岩に相当する岩体から年代測定は実施されていないが、本研究では早津・河内

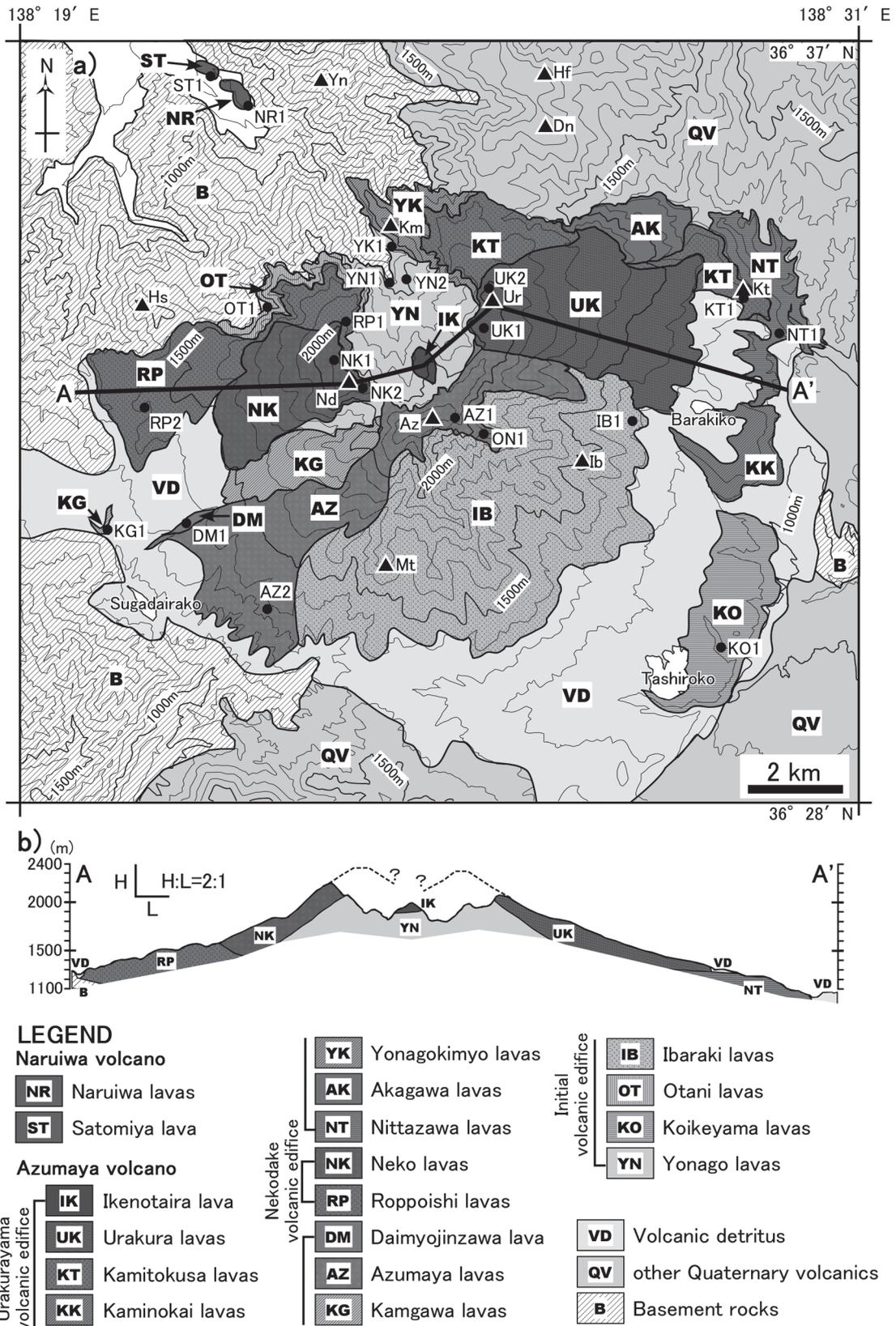


Fig. 2. a) Geological map of Azumaya volcano and Nariwa volcano. Solid circles indicate the outcrops of sampling localities. This map is based on those of Ota and Katada (1955) and Nakano et al. (1998), which were partly revised by considering the stratigraphic results of this study. Abbreviations: Yn, Yonagoyama; Hf, Hafudake; Dn, Donabeyama; Km, Kimyosan; Hs, Hashigoyama; Ur, Urakurayama; Kt, Kamitokusayama; Az, Azumayasan; Nd, Nekodake; Ib, Ibarakiyama; Mt, Matoiwayama. b) Cross-section along the line A-A' on the geological map.

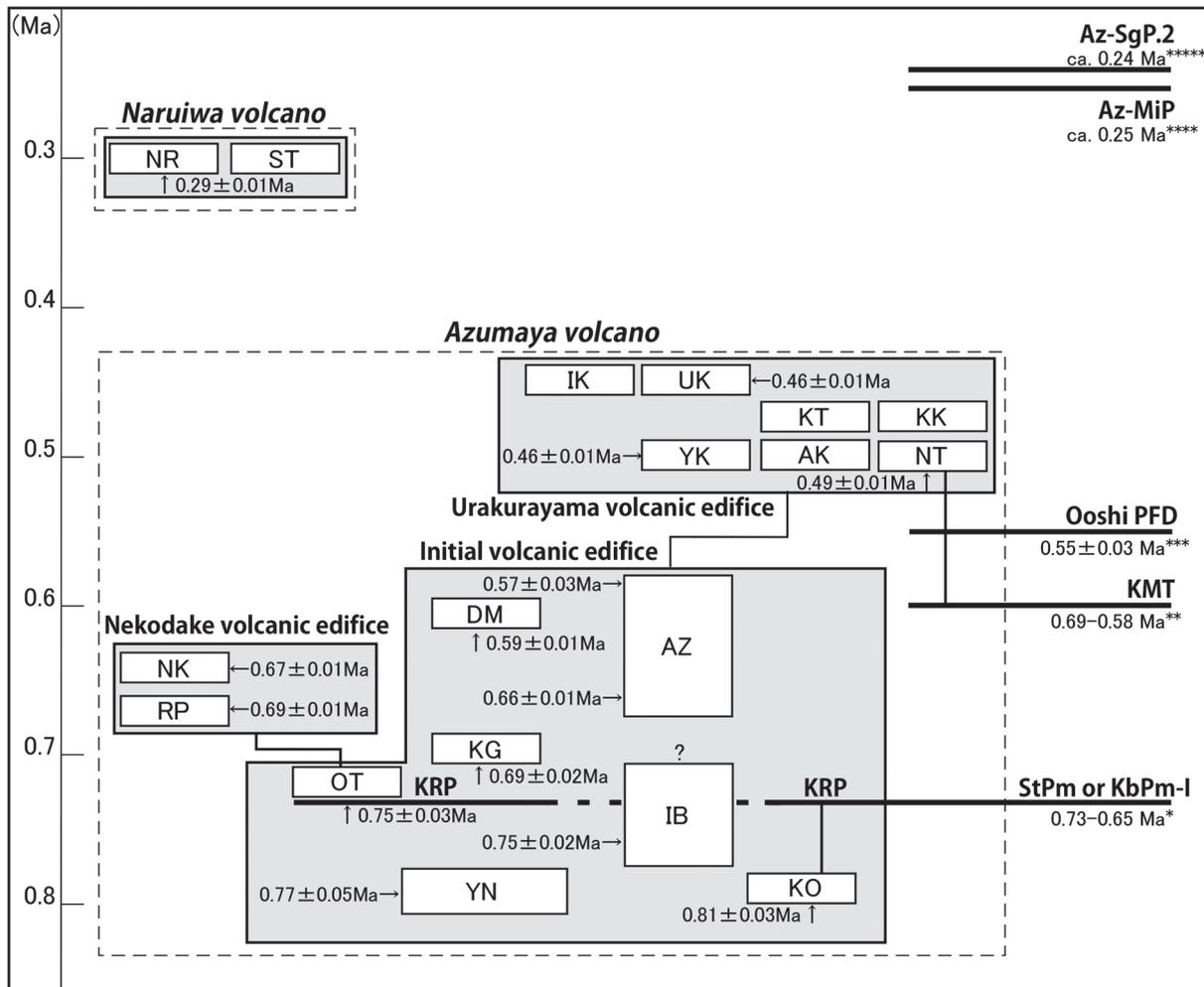


Fig. 3. Stratigraphy of Azumaya volcano and Naruiwa volcano. Data for the stratigraphic relationships among tephra are after Suzuki and Hayakawa (1990), Yaguchi and Tanabe (1990), Tanabe and Collaborative Research Group for Jo-Shin Volcanic Terrain (1992), and Takeshita and Tanabe (2010). The ages of the tephra and pyroclastic flow deposits are after *Kio-ka et al. (1998), **Suzuki (2000), ***Kaneko et al. (1989), ****Machida and Arai (2003), and *****Oishi (2009). Abbreviations: NR, Naruiwa lavas; ST, Satomiya lava; IK, Ikenotaira lava; UK, Urakura lavas; KK, Kaminokai lavas; KT, Kamitokusa lavas; AK, Akagawa lavas; YK, Yonagokimyo lavas; NT, Nittazawa lavas; NK, Neko lavas; RP, Roppoishi lavas; AZ, Azumaya lavas; DM, Daimyojinzawa lava; KG, Kamgawa lavas; IB, Ibaraki lavas; OT, Otani lavas; YN, Yonago lavas; KO, Koikeyama lavas; KRP, Kuri Pumice; StPm, Satomiya Pumice; KbPm-I, Kambara Pumice I; KMT, Kaishio Kamitakara tephra; Az-MiP, Minohara Pumice bed; Az-SgP.2, Sugadaira Dai2 Pumice bed.

(1997)を踏襲し、葦堂溶岩(溶結凝灰岩)を四阿火山の基盤岩類として扱うことにする。

四阿火山は、噴出物の分布と地形の開析の程度、本研究による活動年代および全岩化学組成から、3つの火山体に分けられる。本研究では、四阿山から茨木山、的岩山にかけての開析の進んだ火山体を初期火山体、根子岳山頂付近から南西麓にかけての緩やかな火山体を根子岳火山体、浦倉山山頂付近から東麓にかけての緩やかな火山体を浦倉山火山体と呼ぶ。鳴岩火山は、米子川下流域に分布する2つの小規模な火山体からなる(Fig. 2)。太田・片田(1955)は、岩相から本火山体を根子岳山頂域に分布する根子溶岩に相当するものと考えた。しかしながら、後述するように、両者は、活動年代および岩石学的特徴が異なることが明らかになったことか

ら、本研究では四阿火山から区別した。四阿火山および鳴岩火山の層序関係図を Fig. 3 に示す。

1. 初期火山体(活動時期; 約 80~55 万年前)

本火山体は、四阿火山の最初期の火山体で、米子溶岩層、小池山溶岩層、茨木溶岩類、大谷溶岩層、神川溶岩層、四阿溶岩類、大明神沢溶岩からなる。本研究では米子溶岩層、小池山溶岩層、四阿溶岩類および大明神沢溶岩について新たに地質調査を行った。茨木溶岩類、大谷溶岩層および神川溶岩層の分布については太田・片田(1955)を踏襲する。

米子溶岩層(太田・片田, 1955 命名)は、主に根子岳~四阿山~浦倉山の環状の崩壊地形内に分布する溶岩とそれに伴う同質の火砕岩で構成される。環状の崩壊地形内では少なくとも3枚以上の溶岩が確認される。米子不動尊付近では柱

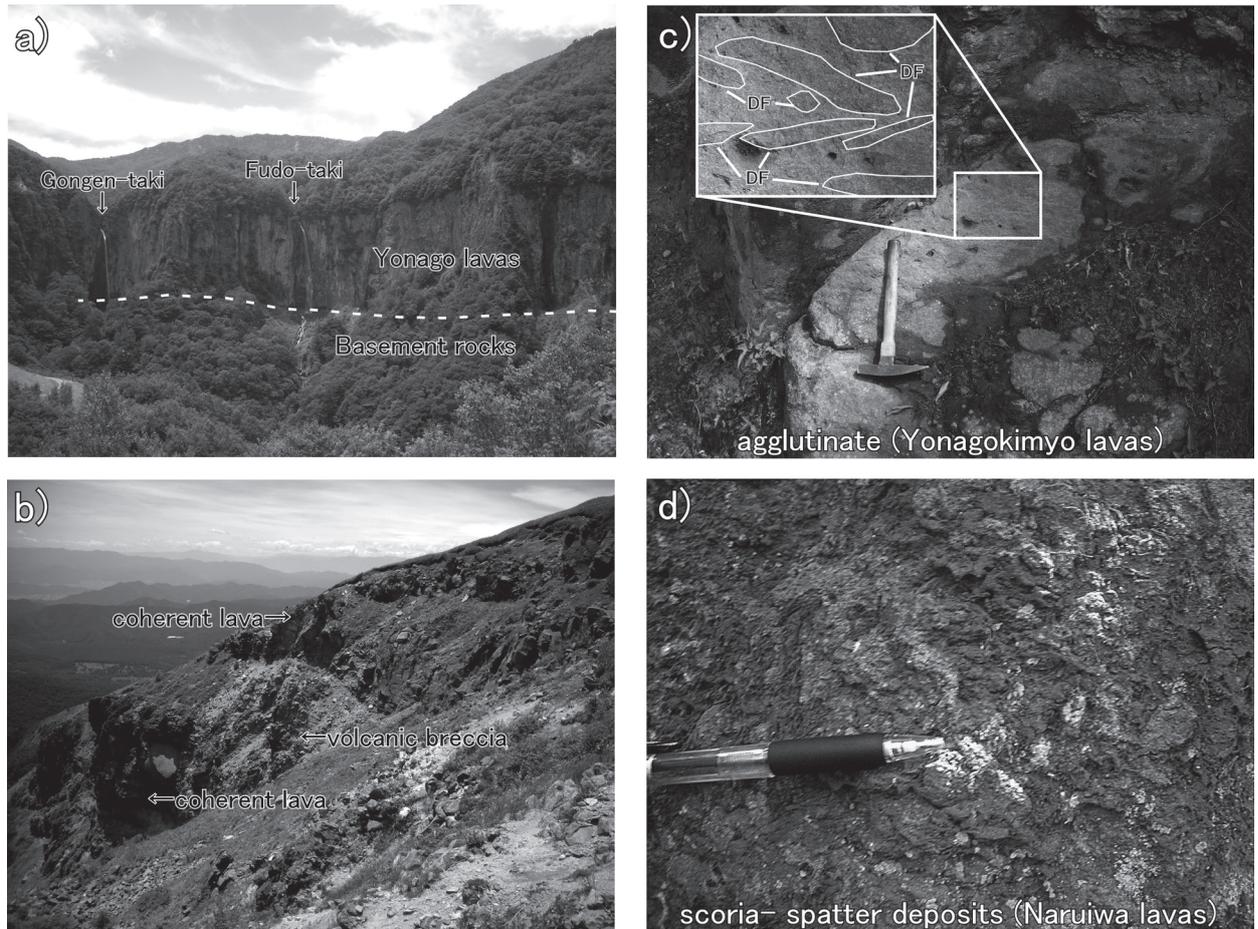


Fig. 4. Representative outcrops of lavas and pyroclastic rocks. a) Yonago lavas overlying basement rocks. The outcrop at Fudo-taki waterfall is 85 m high. Photographed from the observation platform at Yonago falls. b) Coherent lava and volcanic breccia in the Nekodake volcanic edifice. Photographed from the top of Nekodake. c) Close-up of the agglutinate deposits in the Yonagokimyo lavas. Flat and dense lithic fragments (DF) have an average major axis of 10 cm. The rock hammer for scale is 35 cm long. d) Close-up of the scoria-spatter deposits from the Naruiwa lavas. Grain size of scoria has an average major axis of 5 cm, with a maximum of 15 cm. These scorias are spattered and roughly stratified. The pencil for scale is 14 cm long.

状節理の発達した層厚 50 m 以上の溶岩がみられ、基盤岩類の鮮新世火山岩類の凝灰角礫岩を直接覆う (Fig. 4a)。環状の崩壊地形の稜線付近では、四阿溶岩類および根子岳火山体、浦倉山火山体に覆われる。岩質は単斜輝石含有斜方輝石デイサイトである。本溶岩層からは内海ほか(1998)によって 0.75 ± 0.05 Ma という K-Ar 年代が報告されている。

小池山溶岩層(太田・片田, 1955 命名)は、大横川〜馬洗井戸川下流域に分布する溶岩である。大横川流域で少なくとも 2 枚の溶岩が確認される。噴出物の分布域が他の地質ユニットから離れているため、直接の被覆関係は不明である。岩質は斜方輝石単斜輝石玄武岩質安山岩である。本溶岩層からは金子ほか(1989)によって 0.75 ± 0.05 Ma という K-Ar 年代が報告されている。さらに、本溶岩層は田辺・上信火山団体研究グループ(1992)によって黄白色〜灰白色軽石層である“クリパミス”(KRP) (田辺・上信火山団体研究グループ, 1992)によって覆われていることが確認されている。本軽石層は、角閃石の化学組成から、古期御岳火山起源の“里

宮パミス”(StPm) (松本盆地団体研究グループ, 2002), あるいは“寒原パミス I”(KbPm-I) (松本盆地団体研究グループ, 2002)に対比される(竹下・田辺, 2010)。StPm および KbPm-I の噴出年代は、K-Ar 年代が得られている古期御岳火山の溶岩との層序関係から、それぞれ $0.73 \sim 0.70$ Ma (松本盆地団体研究グループ, 2002), $0.70 \sim 0.65$ Ma (Kioka et al., 1998)の間と推定されている。

茨木溶岩類(太田・片田, 1955)は、茨木山からの岩山にかけて広く分布する溶岩および火砕岩である。太田・片田(1955)によると、本地質ユニットは細分可能なものを一括したとされていることから、複数の地質ユニットを包括し、ある程度の活動期間を持った地質ユニットであると判断される。稜線付近で四阿溶岩類に覆われる。的岩山周辺では、北北東-南南西方向で直立した岩脈が数 100 m にわたって貫入している様子が観察される。岩質はかんらん石含有斜方輝石単斜輝石〜斜方輝石単斜輝石玄武岩質安山岩である。

大谷溶岩層(太田・片田, 1955)は、大谷不動〜米子川左岸

にかけて分布する溶岩である。大谷不動付近では少なくとも2枚の溶岩が確認される。板状節理の発達した層厚30 m以上の本溶岩層は、“クリバミス”(KRP)(田辺・上信火山団体研究グループ, 1992)を挟在する湖成層および基盤岩類の泥岩を直接覆う。岩質は斜方輝石単斜輝石安山岩である。

神川溶岩層(太田・片田, 1955)は、菅平高原の唐沢の滝付近および大明神沢上流に分布する溶岩である。唐沢の滝では、層厚約10 mの板状節理が発達した溶岩が観察される。岩質は斜方輝石単斜輝石安山岩である。本溶岩層からは金子ほか(1989)によって 0.65 ± 0.04 MaというK-Ar年代が報告されている。

四阿溶岩類(太田・片田, 1955 命名)は、四阿山山頂周辺から滝ノ入沢右岸～大明神沢左岸にかけて分布する溶岩および同質の火砕岩である。太田・片田(1955)は、根子岳の上部および根子岳北方標高1992 m地点周辺を構成する溶岩についても四阿溶岩に含めたが、後述するように、全岩化学組成などの岩石学的特徴が異なることから、これらを構成する地質ユニットについては本地質ユニットから区別した。また、後述するように、K-Ar年代から本地質ユニットは、10万年程度の活動期間を持ち細分可能な複数の地質ユニットを内包していると判断される。四阿山山頂部付近では、板状節理が発達した溶岩が少なくとも5枚以上観察される。鬼岩周辺(ON1地点付近)では、ほぼ東西方向で直立した岩脈が数10 mにわたって貫入している様子が観察される。岩質は斜方輝石安山岩～斜方輝石単斜輝石安山岩である。

大明神沢溶岩(新称)は、大明神沢の下流域に分布する1枚の溶岩である。太田・片田(1955)では根子溶岩の一部とされたが、後述する根子岳を構成する地質ユニットとは岩石学的特徴が異なることから区別し、新称を用いた。岩質は斜方輝石含有単射輝石かんらん石玄武岩質安山岩である。

2. 根子岳火山体(活動時期; 70～65 万年前)

本火山体は、根子岳山頂付近から南西麓にかけての緩やかな斜面を構成する火山体で、六方石溶岩層、根子溶岩類からなる。本研究では両地質ユニットについて新たに地質調査を行った。

六方石溶岩層(太田・片田, 1955 命名)は、根子岳北方標高1992 m地点周辺から菅平高原にかけて分布する溶岩である。太田・片田(1955)は、根子岳北方標高1992 m地点周辺に分布する地質ユニットを四阿溶岩に含めたが、全岩化学組成などの岩石学的特徴が四阿山周辺に分布する四阿溶岩類とは異なり山麓域に分布する六方石溶岩層と類似し、層序学的にも大谷溶岩層を覆い、後述する根子溶岩類に覆われることから、本研究では六方石溶岩層に含めた。根子岳北方標高1992 m地点周辺では少なくとも2枚以上の溶岩が確認され、菅平高原では柱状節理が顕著に発達した溶岩が観察される。岩質は斜方輝石単斜輝石デイサイトである。本溶岩層からは金子ほか(1989)によって 0.68 ± 0.04 MaというK-Ar年代が報告されている。

根子溶岩類(太田・片田, 1955 命名)は、根子岳山頂から南西麓に分布する溶岩および溶結火砕岩である(Fig. 4b)。太田・片田(1955)は、根子岳山頂周辺に分布する地質ユニッ

トを四阿溶岩に含めたが、全岩化学組成など岩石学的特徴が四阿山山頂周辺に分布する四阿溶岩類と異なり根子岳の山麓域に分布する根子溶岩類と類似し、層序学的にも前述の六方石溶岩層を覆うことから、本研究では根子溶岩類に含めた。また、太田・片田(1955)は、米子川下流域の小岩体(本研究の鳴岩火山)についても根子溶岩類としたが、後述するように、岩石学的特徴および活動時期が山頂域に分布する根子溶岩類と異なることから、本地質ユニットから区別した。根子岳山頂付近では板状節理が顕著に発達した少なくとも5枚以上の溶岩が確認される。岩質は斜方輝石単斜輝石デイサイトである。

3. 浦倉山火山体(活動時期; 50～45 万年前)

本火山体は、浦倉山山頂付近から東麓にかけての緩やかな斜面を構成する火山体で、仁田沢溶岩層、赤川溶岩層、上ノ貝溶岩層、米子奇妙溶岩類、上砥草溶岩層、浦倉溶岩層、池ノ平溶岩からなる。本研究では米子奇妙溶岩類および浦倉溶岩層について新たに地質調査を行い、仁田沢溶岩層、赤川溶岩層、上ノ貝溶岩層、上砥草溶岩層および池ノ平溶岩の分布については先行研究の結果を踏襲する。

仁田沢溶岩層(太田・片田, 1955)は、孺恋高原東縁の万座川流域に分布する溶岩である。試料を採取したNT1地点付近では、少なくとも2枚の板状節理が発達した溶岩が確認される。上砥草山付近で上砥草溶岩層に覆われる。岩質は斜方輝石単斜輝石安山岩である。本溶岩層からは、金子ほか(1989)によって万座川左岸に分布する草津白根火山起源の太子火砕流堆積物(早川, 1983)の上位に重なる溶岩から 0.56 ± 0.03 MaというK-Ar年代が報告されている。また、万座川下流域では、太子火砕流の下位に多量の黒雲母を含有する降下火山灰である“ギンギラ”(田辺・上信火山団体研究グループ, 1992)が火山山麓扇状地堆積物に挟在しており、斎藤・クリスタル・アッシュ(大町 Apm, BP)研究会(1996)は、本火山灰を松本盆地南縁部に分布する梨ノ木ローム層に挟在する結晶質火山灰である“CI”(松本盆地団体研究グループ, 1972)に対比されるとしている。この“CI”は上宝火砕流堆積物(金子ほか, 1976)に対比されていることから、“ギンギラ”は広域テフラのひとつである貝塩上宝テフラ(KMT)(鈴木, 2000)と同一と考えられる。KMTの噴出年代は、鈴木(2000)によって数多くの放射年代および酸素同位体ステージとの関係から0.69～0.58 Maの間と推定されている。

赤川溶岩層(太田・片田, 1955)は、万座川上流域に分布する溶岩で、太田・片田(1955)によると、岩質はかんらん石含有斜方輝石単斜輝石安山岩である。

上ノ貝溶岩層(太田・片田, 1955)は、孺恋高原のバラキ湖周辺に分布する溶岩である。溶岩末端崖の地形がよく保存されており、地形から複数枚の溶岩流で構成されていると判断される。岩質は斜方輝石単斜輝石安山岩である。

米子奇妙溶岩類(太田・片田, 1955 命名)は、米子川の右岸の奇妙山周辺に分布する溶岩および溶結火砕岩である。試料を採取したYN1地点付近では、少なくとも3枚以上の溶岩流が確認される。また、米子川右岸の林道の標高1440 m付近では、アグルチネートが観察される(Fig. 4c)。基盤岩

Table 1. K-Ar ages of volcanic rocks from Azumaya volcano and Naruiwa volcano.

Locality No.	Sample ID	Geological unit	Sample wt. (g)	K ₂ O (wt. %)	Rad. ⁴⁰ Ar* (10 ⁻⁸ ml STP/g)	Non rad. ⁴⁰ Ar (%)	K-Ar age* (Ma)
Naruiwa volcano							
NR1	Az-Nk1	Naruiwa lavas	0.331	1.58	1.55 ± 0.06	86.1	0.30 ± 0.01
			0.324		1.45 ± 0.08	89.7	0.28 ± 0.02
							<i>Mean age:</i> 0.29 ± 0.01
Azumaya volcano							
<i>Urakurayama volcanic edifice</i>							
UK1	Az-Uk1	Urakura lavas	0.331	1.73	2.54 ± 0.05	62.7	0.46 ± 0.01
			0.325		2.49 ± 0.05	75.2	0.45 ± 0.01
							<i>Mean age:</i> 0.46 ± 0.01
YK1	Az-Yk1	Yonagokimyo lavas	0.327	2.16	3.20 ± 0.05	54.9	0.46 ± 0.01
NT1	Az-NT1	Nittazawa lavas	0.333	1.73	2.74 ± 0.06	67.8	0.49 ± 0.01
<i>Nekodake volcanic edifice</i>							
NK1	Az-Az4	Neko lavas	0.334	2.74	5.93 ± 0.08	55.6	0.67 ± 0.01
			0.327		5.8 ± 0.1	68.5	0.66 ± 0.01
							<i>Mean age:</i> 0.67 ± 0.01
RP1	Az-Az3	Roppoishi lavas	0.335	2.97	6.57 ± 0.08	48.2	0.69 ± 0.01
<i>Initial volcanic edifice</i>							
DM1	Az-Nk2	Daimyojinzawa lava	0.340	1.01	1.91 ± 0.04	69.1	0.59 ± 0.01
AZ2	Az-Az2	Azumaya lavas	0.338	1.69	3.1 ± 0.2	88.7	0.57 ± 0.03
AZ1	Az-Az1	Azumaya lavas	0.331	1.86	3.97 ± 0.06	50.1	0.66 ± 0.01
KG1	Az-Kg1	Kamgawa lavas	0.291	1.96	4.4 ± 0.1	77.1	0.69 ± 0.02
OT1	Az-Ot1	Otani lavas	0.275	1.33	3.2 ± 0.1	84.3	0.75 ± 0.03
IB1	Az-Ib1	Ibaraki lavas	0.334	1.13	2.73 ± 0.05	72.5	0.75 ± 0.02
KO1	Az-Ko1	Koikeyama lavas	0.300	1.11	2.90 ± 0.09	83.5	0.81 ± 0.03
YN1	Az-YN1	Yonago lavas	0.331	1.78	4.6 ± 0.5	94.3	0.80 ± 0.08
			0.254		4.4 ± 0.3	91.3	0.76 ± 0.05
							<i>Mean age:</i> 0.77 ± 0.04

The groundmass fractions are used for age determinations. The decay constants used in this study are $\lambda_{\beta}=4.962 \times 10^{-10}/y$, $\lambda_{e}=0.581 \times 10^{-10}/y$, and $^{40}K/K_{total}=0.01167$ atom % (Steiger and Jäger, 1977). Standard Temperature and Pressure (STP) used in this study are 0° Celsius, and 1 atm pressure. *: Errors are at the 1 σ uncertainty level.

類および米子溶岩層を直接覆い、上砥草溶岩層に覆われる。岩質は斜方輝石単斜輝石安山岩である。

上砥草溶岩層(太田・片田, 1955)は、上砥草山周辺および浦倉山の北方に分布する溶岩である。上砥草山付近で見られる溶岩は、やや風化が進んでおり脆い。岩質は斜方輝石単斜輝石安山岩である。

浦倉溶岩層(太田・片田, 1955 命名)は、主に浦倉山の東斜面に分布する溶岩および同質の火砕岩である。地形の判読から、複数枚の溶岩流で構成されていると判断される。岩質は斜方輝石単斜輝石安山岩である。本溶岩層からは金子ほか(1989)によって 0.46 ± 0.02 Ma という K-Ar 年代が報告されている。

池ノ平溶岩(太田・片田, 1955)は、米子川の最上流域の標高 2113 m 付近に分布する溶岩である。太田・片田(1955)では、本溶岩をカルデラ内の中央火口丘としたが、地形的に顕著な溶岩ドーム状の構造などの高まりを持っていない。また、地形断面(Fig. 2)を考慮すると、侵食を免れた浦倉山火山体の一部と解釈することも可能であり、さらに、太田・片田(1955)が示した岩石学的特徴も浦倉山火山体の岩石に類似することなどから、本研究では、浦倉山火山体を構成する地質ユニットに含めた。太田・片田(1955)によると、岩質

は斜方輝石単斜輝石安山岩である。

4. 鳴岩火山(活動時期; 約 30 万年前)

本火山体は、米子川下流域に分布する小規模な火山体(Fig. 2)で、鳴岩溶岩類、里宮溶岩の2つの地質ユニットからなる。太田・片田(1955)は、米子川下流域において本火山体に相当する根子溶岩の3つの小規模な岩体を記載したが、最も南東に分布する岩体については、本研究では見出すことが出来なかった。

鳴岩溶岩類(新称)は、米子川下流域の鳴岩付近に分布する溶岩および溶結火砕岩である。本溶岩類が構成する小丘(標高 867 m)の南斜面標高 780 m 付近では溶結したスコリアが認められ(Fig. 4d)、鳴岩付近では板状節理が発達した層厚約 20 m の溶岩が分布する。岩質は斜方輝石含有かんらん石単斜輝石安山岩である。

里宮溶岩(新称)は、米子不動里宮付近に分布する1枚の溶岩である。岩質は斜方輝石単斜輝石デイサイトである。

K-Ar 年代測定

1. 測定用試料および測定方法

K-Ar 年代測定は、四阿火山の初期火山体から 8 試料、根子岳火山体から 2 試料、浦倉山火山体から 3 試料、鳴岩

Table 2. Major and trace element data of volcanic rocks from Azumaya volcano and Naruiwa volcano. Sampling localities are shown in Fig. 2.

Loc. No.	Unit	Rock type	SiO ₂ (wt. %)	TiO ₂ (wt. %)	Al ₂ O ₃ (wt. %)	Fe ₂ O ₃ (wt. %)	MnO (wt. %)	MgO (wt. %)	CaO (wt. %)	Na ₂ O (wt. %)	K ₂ O (wt. %)	P ₂ O ₅ (wt. %)	Total (wt. %)
Naruiwa volcano													
NR1	Naruiwa lavas	(cpx)-ol-opx A.	58.40	0.69	15.88	8.23	0.12	3.82	6.74	2.87	1.52	0.20	98.47
ST1	Satomiya lava	opx-cpx D.	64.75	0.58	15.51	5.97	0.11	2.42	4.99	3.02	2.42	0.14	99.91
Azumaya volcano													
Urakurayama volcanic edifice													
UK1	Urakura lavas	opx-cpx A.	58.81	0.77	16.39	7.80	0.12	3.79	6.88	3.17	1.33	0.18	99.25
UK2	Urakura lavas	opx-cpx A.	59.97	0.73	16.44	8.58	0.13	3.63	6.64	2.79	1.58	0.13	100.62
KT1	Kamitokusa lavas	opx-cpx A.	59.73	0.71	16.17	7.36	0.13	3.14	4.81	2.45	1.90	0.12	96.52
YK1	Yonagokimyo lavas	opx-cpx A.	60.88	0.67	15.70	7.36	0.12	3.46	6.16	2.88	1.77	0.16	99.72
NT1	Nittazawa lavas	opx-cpx A.	58.23	0.75	16.84	7.42	0.13	3.60	5.90	2.76	1.60	0.15	99.10
Nekodake volcanic edifice													
NK1	Neko lavas	opx-cpx D.	63.98	0.85	15.93	6.04	0.10	1.46	3.29	2.94	2.52	0.23	97.34
NK2	Neko lavas	opx-cpx D.	66.67	0.71	14.91	4.99	0.08	1.21	3.95	3.39	2.81	0.19	98.91
RP1	Roppoishi lavas	opx-cpx D.	66.63	0.70	14.77	5.05	0.10	1.24	3.88	3.45	2.79	0.20	98.80
RP2	Roppoishi lavas	opx-cpx D.	65.54	0.74	15.45	5.09	0.07	0.85	3.45	3.22	2.78	0.19	97.38
Initial volcanic edifice													
DM1	Daimyojinzawa lava	(opx)-cpx-ol BA.	52.96	0.97	17.61	9.35	0.13	3.58	8.39	3.07	0.87	0.23	97.16
AZ2	Azumaya lavas	opx A.	58.88	0.91	17.21	7.44	0.13	2.31	7.06	3.33	1.52	0.23	99.01
AZ1	Azumaya lavas	opx-cpx A.	57.06	0.85	17.20	7.10	0.11	2.41	6.97	3.24	1.41	0.23	96.58
KG1	Kamgawa lavas	opx-cpx A.	59.34	0.87	17.41	7.08	0.11	2.13	6.81	3.18	1.47	0.23	98.63
OT1	Otani lavas	opx-cpx A.	57.42	0.80	18.79	7.20	0.12	2.54	7.72	3.52	1.07	0.22	99.40
IB2	Ibaraki lavas	cpx-opx BA.	54.82	0.98	17.07	8.97	0.15	3.61	7.14	3.15	0.96	0.22	97.07
KO1	Koikeyama lavas	opx-cpx BA.	55.49	0.83	17.34	8.73	0.15	3.60	8.01	3.00	0.80	0.20	98.14
YN1	Yonago lavas	(cpx)-opx D.	64.51	0.78	15.64	5.62	0.13	1.61	4.54	4.13	1.76	0.28	99.00
YN2	Yonago lavas	(cpx)-opx D.	63.67	0.78	15.36	5.66	0.14	1.40	4.65	4.05	1.61	0.27	97.59
Dyke													
ON1	Dyke	opx-cpx A.	57.75	0.80	20.16	6.71	0.12	2.02	7.54	3.48	1.07	0.23	99.88

火山から 1 試料の計 14 試料について行った。試料の採取位置および岩石記載は付録に示す。

K-Ar 年代測定は以下の手順で行った。岩石試料を軟鉄乳鉢で粉碎したのち、0.25~0.50 mm 径にふるい分け、その中からアイソダイナミックセパレーターおよびハンド磁石を用いて可能な限り斑晶鉱物の結晶片を除去した石基濃集フラクションをアルゴン同位体測定用試料とした。カリウムの定量は、アルゴン同位体測定用試料をさらにメノウ乳鉢で細粉化したものを用いた。アルゴン同位体測定は、産業技術総合研究所の VG Isotopes 社製 1200C 型希ガス質量分析計を用い、³⁸Ar 濃縮スパイクによる同位体希釈法で行った。アルゴン同位体の測定手順および放射起源 ⁴⁰Ar の定量に対する誤差の算出方法は、宇都ほか(1995)に従った。また、Az-YN1, Az-Az4, Az-Uk1 および Az-Nk1 の 4 試料については、アルゴン同位体測定を独立に 2 回繰り返した。カリウムの定量は、産業技術総合研究所のアサヒ理化学製作所 FP-33D 型蛍光光度計を用い、内部標準としてリチウムを添加する蛍光光度法(松本, 1989)を採用した。カリウム定

量に対する誤差は、松本(1989)による岩石標準試料の繰り返し測定の結果から、 $\pm 0.5\%$ (1 σ 水準)と見積もった。K-Ar 年代計算に用いた定数は、 $\lambda_c = 0.581 \times 10^{-10}/y$, $\lambda_\beta = 4.962 \times 10^{-10}/y$, $^{40}K/K_{total} = 0.01167\%$ (Steiger and Jäger, 1977)である。

2. 測定結果

K-Ar 年代測定の結果、米子溶岩層が 0.77 ± 0.05 Ma (重み付き平均年代)、小池山溶岩層が 0.81 ± 0.03 Ma、茨木溶岩層が 0.75 ± 0.02 Ma、大谷溶岩層が 0.75 ± 0.03 Ma、神川溶岩層が 0.69 ± 0.02 Ma、四阿溶岩層が 0.66 ± 0.01 Ma と 0.57 ± 0.03 Ma、大明神沢溶岩が 0.59 ± 0.01 Ma、六方石溶岩層が 0.69 ± 0.01 Ma、根子溶岩層が 0.67 ± 0.01 Ma (重み付き平均年代)、仁田沢溶岩層が 0.49 ± 0.01 Ma、米子奇妙溶岩層が 0.46 ± 0.01 Ma、浦倉溶岩層が 0.46 ± 0.01 Ma (重み付き平均年代)、鳴岩溶岩層が 0.29 ± 0.01 Ma (重み付き平均年代)であった(Table 1)。すなわち、四阿火山の初期火山体からは 0.81 ± 0.03 Ma~ 0.57 ± 0.03 Ma、根子岳火山体からは 0.69 ± 0.01 Ma~ 0.67 ± 0.01 Ma、浦倉

Table 2. Continued.

Loc. No.	V	Ba	Sr	Y	Zr	Cr	Co	Cu	Ni	Zn	Ga	Rb	Nb	La	Ce
<i>Naruiwa volcano</i>															
NR1	173	349	368	15.1	94	290	27	80	120	70	16	37	2.1	9.8	20.4
ST1	129	551	280	18.0	117	40	13	50	<20	60	15	61	3.0	11.7	26.7
<i>Azumaya volcano</i>															
Urakurayama volcanic edifice															
UK1	201	390	418	15.0	87	60	19	40	30	80	16	28	2.0	9.2	20.2
UK2	207	418	317	20.5	83	40	22	40	20	<30	15	37	3.2	9.9	20.0
YK1	183	467	289	22.7	101	60	19	120	<20	90	16	45	2.2	12.0	24.4
KT1	166	547	275	18.0	101	30	18	80	30	70	15	45	2.0	31.8	18.9
NT1	207	417	326	19.2	88	40	19	40	<20	70	17	36	1.9	8.9	17.8
Nekodake volcanic edifice															
NK1	122	690	285	23.0	137	30	11	20	<20	70	17	57	4.0	13.9	32.3
NK2	93	704	267	26.0	145	<20	8	30	<20	60	15	63	3.0	14.8	31.9
RP1	85	706	260	27.0	150	<20	8	30	<20	80	16	62	4.0	18.1	40.5
RP2	95	696	260	25.0	143	<20	7	20	<20	60	15	65	3.0	16.0	33.0
Initial volcanic edifice															
DM1	282	265	511	16.8	61	40	24	90	<20	60	19	15	3.6	8.7	18.8
AZ2	216	455	376	24.4	77	<20	16	70	<20	40	17	30	2.2	12.5	24.6
AZ1	190	397	395	22.9	80	30	17	40	<20	40	18	28	2.6	10.8	21.8
KG1	171	433	387	22.0	86	30	14	60	<20	80	18	29	3.0	11.6	25.0
OT1	169	372	396	20.0	69	50	16	40	<20	80	18	19	2.0	8.7	20.1
IB2	260	319	405	23.0	64	40	22	90	<20	100	19	17	2.0	10.9	19.8
KO1	223	304	364	15.0	51	30	20	30	<20	90	17	13	2.0	6.9	16.5
YN1	68	547	308	27.6	103	<20	7	20	<20	70	17	30	2.6	12.2	26.3
YN2	72	535	303	25.0	93	<20	8	10	<20	70	16	28	3.0	12.6	25.9
Dyke															
ON1	148	378	434	21.0	72	<20	13	50	<20	80	19	17	2.0	14.7	27.0

山火山体からは 0.49 ± 0.01 Ma~ 0.46 ± 0.01 Ma、鳴岩火山の鳴岩溶岩類からは 0.29 ± 0.01 Ma(重み付き平均年代)という K-Ar 年代が得られた。今回得られた K-Ar 年代は、溶岩の被覆関係から類推される新旧関係と矛盾していない。また、2 回の繰り返し測定で得られた 4 試料の K-Ar 年代も、それぞれ誤差の範囲内で一致していることから、今回新たに得られた K-Ar 年代は、それぞれの火山岩の噴出年代を示していると考えられる。

全岩化学組成

全岩化学組成分析はカナダの Activation Laboratories Ltd. に依頼し、誘導結合プラズマ質量分析計(ICP-MS)で測定された。分析値を Table 2 に示す。四阿火山噴出物は、SiO₂ 量が約 53~67 wt.% と玄武岩質安山岩からデイサイトに至る広い組成範囲を示す(Fig. 5)。一方、鳴岩火山噴出物は、SiO₂ 量が約 58 wt.% の安山岩(鳴岩溶岩類)、約 65 wt.% のデイサイト(里宮溶岩)である(Fig. 5)。主成分元素組成の特徴をみると、K₂O-SiO₂ 図では、High-K の領域にプロットされる根子岳火山体を除き、いずれも中間カリウム系列(Gill, 1981)に分類される(Fig. 5h)。また、四阿火山の浦倉山火山体および鳴岩火山は他の火山体と比べ、

MgO 量に富み、Na₂O 量および P₂O₅ 量に乏しい傾向を示す(Fig. 5e, 5g, 5i)。さらに、FeO*/MgO-SiO₂ 図では、火山体毎に明瞭な組成の違いが認められる(Fig. 5j)。一方、微量元素組成の特徴をみると、四阿火山の初期火山体は他の火山体と比べ Y 量に富む傾向を示す(Fig. 6d)。また、各火山体の液相濃集元素比をみると、初期火山体は根子岳火山体と比べ、低い Rb/Zr 比、Rb/Y 比および Zr/Y 比を示す(Fig. 7)。

考 察

1. 四阿火山の噴出中心地域の推定

四阿火山は、噴出物の分布と地形の開析の程度、本研究による活動年代および全岩化学組成の違いから、初期火山体、根子岳火山体、浦倉山火山体の 3 つの火山体に分けられる。ここでは地質ユニットの分布や火山岩の産状から、各火山体の推定噴出中心について考察する。

初期火山体の噴出物は、四阿火山の中央部に広く分布している。本火山体を構成する地質ユニットのうち、大谷溶岩層および最上位の四阿溶岩類については、それらの分布から山頂域の環状の崩壊地形内に噴出中心があったと推定される。また、米子溶岩層についても、その分布が崩壊地形内に限定

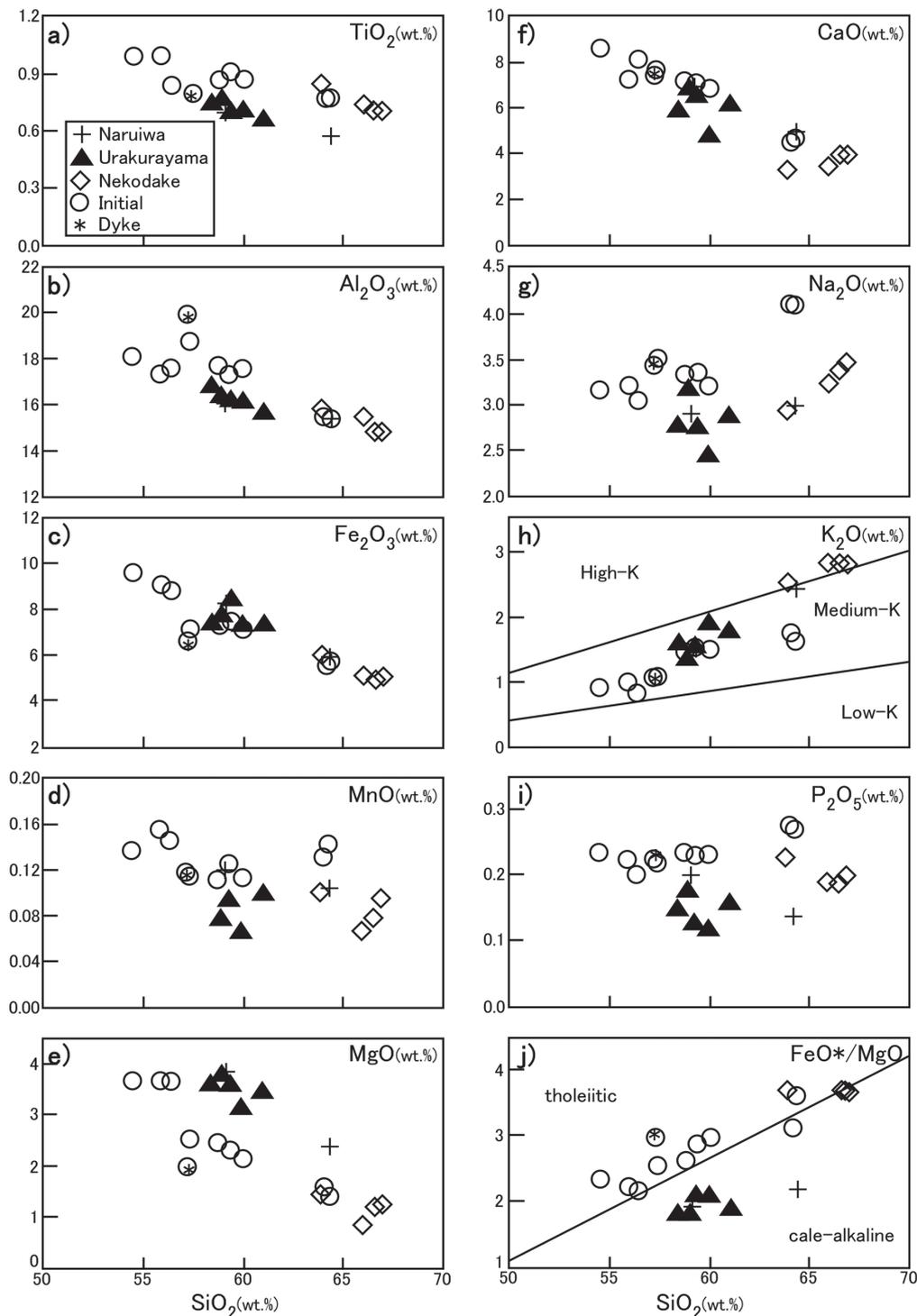


Fig. 5. Silica variation diagrams of major elements for rocks of Azumaya volcano and Naruiwa volcano. The boundary lines in the SiO₂ vs. K₂O diagram are after Gill (1981). The boundary line in the FeO*/MgO vs. SiO₂ diagram is after Miyashiro (1974).

されていることから、崩壊地形内に噴出中心があった可能性が高い。一方、炭木溶岩類は、太田・片田(1955)および本研究において環状の崩壊地形の内側に見出されていない。このことから、推定される炭木溶岩類の噴出中心は環状の崩壊地形の外側にあったことが示唆される。その他の地質ユニッ

トについては、十分な証拠が得られていないが、噴出物の分布を考慮すると、少なくとも主火山体の南方に独立して分布する小池山溶岩層については、山頂域の環状の崩壊地形の南側に噴出中心が独立して存在していたことが推定される。

根子岳火山体の噴出物は、四阿火山の西部に分布し、根子

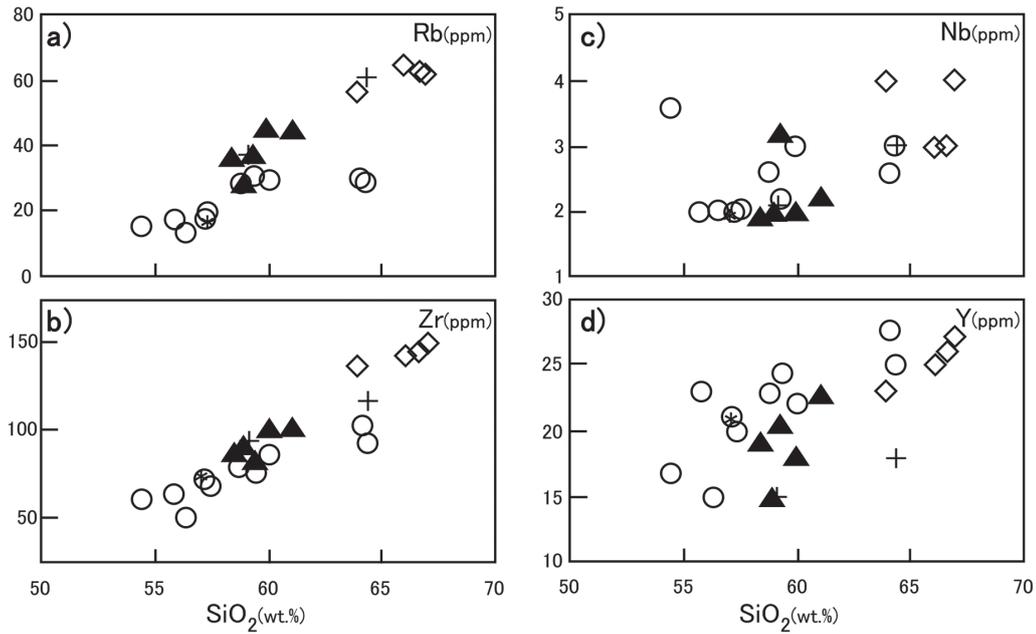


Fig. 6. Silica variation diagrams of trace elements for rocks of Azumaya volcano and Naruiwa volcano. Symbols are the same as in Fig. 5.

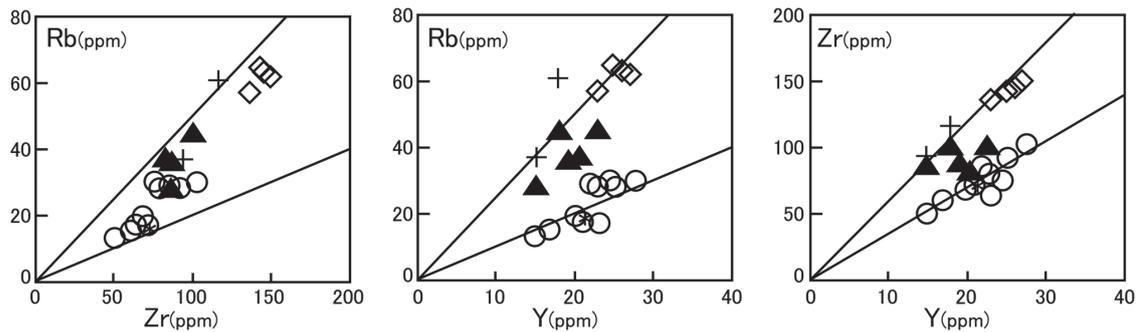


Fig. 7. Covariant diagrams of several incompatible elements in rocks from Azumaya volcano and Naruiwa volcano. Symbols are the same as in Fig. 5.

岳から菅平高原にかけての緩やかな山体を形成している。本火山体を構成する六方石溶岩層および根子溶岩類の分布から、噴出中心は根子岳より東方の環状の崩壊地形内に推定される (Fig. 2)。

浦倉山火山体の噴出物は、四阿火山の東部に分布し、嬬恋高原から浦倉山にかけての緩やかな山体を形成している。本火山体を構成する地質ユニットのうち、最上位の浦倉溶岩層は、地質ユニットの分布から浦倉山より西方の環状の崩壊地形内に噴出中心が推定される。また、米子奇妙溶岩類は、後述するように米子川右岸の林道沿いでアグルチネートが観察されることから、奇妙山周辺で噴出した可能性が高い。その他の地質ユニットについては、十分な証拠が得られていないが、それぞれの地質ユニットの分布から環状の崩壊地形内あるいは浦倉山周辺に噴出中心があった可能性が推定される。

2. 新たな火山体(鳴岩火山)の区分

米子川下流域に分布する小規模な岩体は、太田・片田

(1955) によって根子溶岩(本研究の根子溶岩類)とされた。しかしながら、この岩体を構成する地質ユニット(本研究の鳴岩溶岩類および里宮溶岩)をみると、鳴岩溶岩類はかんらん石斑晶を含み岩石学的特徴が異なり、里宮溶岩は根子岳山頂周辺の根子溶岩類と肉眼的に岩相が類似するものの、FeO*/MgO-SiO₂ 図では、根子岳火山体を構成するものとは明瞭な組成の違いが認められる (Fig. 5j)。また、前述したように四阿火山の3つの火山体の推定噴出地域は、山頂部の環状の崩壊地形内およびその周辺に推定されるのに対し、鳴岩火山はそれらから約6 km 北西に離れた位置に独立して分布し (Fig. 2)、火口近傍相と解釈可能な溶結したスコリアが観察されることから (Fig. 4d)、分布域周辺で噴出したと考えられる。さらに、K-Ar 年代から、四阿火山と鳴岩火山の活動期の時間間隔(約15 万年)が、四阿火山で認められる活動休止期間が明確なもの(初期火山体の活動終了から浦倉山火山体の活動開始までの約5 万年)よりも十分に長い (Fig. 3)。

これらのことから、米子川下流域に分布する本火山体は、時間空間的にもマグマ組成からも四阿火山とは別個の火山体であると考えられ、本研究では鳴岩火山と新たに定義し、四阿火山から区別した。

3. K-Ar 年代に基づく四阿火山の山体形成史

本研究による地質調査および年代測定の結果とこれまでに報告された放射年代等を併せると、四阿火山の山体形成史は下記のように整理される。

四阿火山は約 80 万年前に活動を開始した。この最初の活動によって初期火山体が形成された。初期火山体の最初の活動は、現在の環状の崩壊地形内に分布するデイサイト(米子溶岩層)の活動と田代湖周辺に分布する玄武岩質安山岩(小池山溶岩層)の活動である。両地質ユニットの層位学的関係は不明であるが、放射年代からほぼ同時期に活動していたと考えられ、分布域からそれぞれ独立した別個の山体を形成していたと考えられる。約 75 万年前には、米子溶岩層からなる火山体の北西斜面に安山岩質の大谷溶岩層の噴出物が流出し、南東斜面には玄武岩質安山岩の茨木溶岩類の噴出物が流出した。約 70 万年前には、初期火山体の南西斜面に安山岩質の神川溶岩層の噴出物が流出した後、西斜面でデイサイト(六方石溶岩層、根子岳溶岩類)の火山活動が発生し、根子岳～菅平高原の緩斜面を形成した。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く (Fig. 8)、互いに組成変化過程が独立したマグマによって形成されたと考えられることから、初期火山体とは別個の火山体(根子岳火山体)であると考えられる。この根子岳火山体の形成とほぼ同時期に、初期火山体では安山岩質の四阿溶岩類の噴出物が流出した。根子岳火山体は数万年程度で活動が終息したが、初期火山体では、引き続き四阿溶岩類の活動が継続し、さらに約 59 万年前には、四阿火山で最も苦鉄質な玄武岩質安山岩の大明神沢溶岩が流出した。初期火山体は約 55 万年前まで活動が継続した。

初期火山体は、根子岳火山体の形成後も活動を継続したのにもかかわらず、根子岳火山体と比べて開析が進んでいる (Fig. 1)。この開析の程度の違いについて十分に説明できないが、根子岳火山体は溶岩や溶結火砕岩で構成される緩い緩斜面からなるのに対し、初期火山体は根子岳火山体と比べて急峻で溶岩と火砕岩で構成されることから、侵食抵抗力の違いがあったこと、あるいは根子岳火山体と同じ水系(神川に合流する水系)に属する地域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のひとつとして考えられる。

5 万年程度の活動休止期を挟み、約 50 万年前には、浦倉山周辺で安山岩質の火山活動が発生し、仁田沢溶岩層や上ノ貝溶岩層が東へ流下した。また、奇妙山周辺では安山岩質の米子奇妙溶岩類が噴出した。この一連の安山岩の Rb/Y 比は、初期火山体の噴出物と根子岳火山体の間の組成比を示し (Fig. 8)、両火山体とは別個の火山体(浦倉山火山体)であると考えられる。そして、約 45 万年前には、浦倉溶岩層が流出し、浦倉山～孺恋高原の緩斜面を形成、浦倉山火山体の活動が終息した。

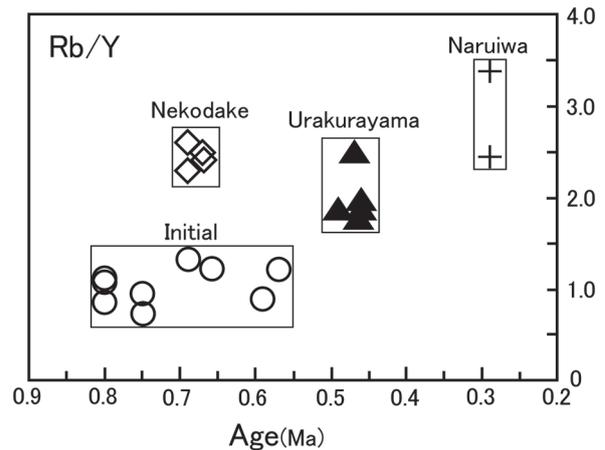


Fig. 8. Temporal changes in incompatible element ratios of rocks from Azumaya volcano and Naruiwa volcano.

四阿火山の山頂域には環状の崩壊地形が存在する。本研究では、環状の崩壊地形内に分布する池ノ平溶岩を岩石学的特徴の類似から浦倉山火山体に含めた。また、上ノ貝溶岩層および浦倉溶岩層の噴出物は、四阿溶岩類および茨木溶岩類で構成される尾根に遮られて東へ流下している。これらのことを考慮したうえで環状の崩壊地形の形成時期を考察すると、根子溶岩類および四阿溶岩類の形成後、すなわち、初期火山体および根子岳火山体の形成後に北東方向に開いた崩壊地形が形成され、その崩壊地内に浦倉山火山体が形成された。そして、浦倉溶岩層の流出後、すなわち、浦倉山火山体の形成後、西側に開いた崩壊地形が形成された。従って、山頂域の環状の崩壊地形の形成には、少なくとも 2 回の崩壊地形が形成されるイベントが関与したことが推定される。さらに、現在の崩壊地形内には、硫黄鉱床が存在する(太田・片田, 1955)など熱水変質が進んでいる場所も多く、崩壊地形形成後も崩壊壁の拡大が継続していたと推定される。しかしながら、現時点において山麓域にこれらの崩壊地形の形成に関わるイベントに対応する堆積物を見いだされておらず、今後の検討課題である。

そして、約 30 万年前には、四阿火山の北西方の米子里宮付近 (Fig. 1 の ST 地点付近) で、別個の小規模な火山(鳴岩火山)が形成された。

北関東に分布する中期更新世のテフラのうち、町田・新井 (2003) では、四阿^{みのほら}原軽石層 (Az-Mip; 矢口・田辺, 1990)、矢口 (1999) によって横川第二軽石 (中山, 1978) に対比されている菅平第 2 軽石 (Az-SgP.2; 鈴木・早川, 1990) の少なくとも 2 枚が四阿火山起源として掲載されている。Az-Mip の年代は層位学的に Az-Mip が約 25 万年前と推定されている (町田・新井, 2003)。Az-SgP.2 については、大石 (2009) は本軽石層が広域火山灰である阿多鳥浜テフラ (Ata-Th) の直上に分布することから、約 24 万年前 (大石, 2009) と推定している。そのため、両軽石層とも四阿火山の山体で認められる最上位の溶岩である浦倉溶岩層の K-Ar 年代より有意に若い。これらの軽石には、山体の溶岩では認

められていない普通角閃石やカミングトン閃石が含まれており(大石, 2009 など), 環状の崩壊地形内に火山体が存在, あるいは軽石のみを噴出させた火口が存在していたなどが考えられるが, 現時点では給源も含めて十分に言及できないので今後の課題として残される。

上述したように, 四阿火山の3つの火山体は, 互いに組成変化過程の独立したマグマによって形成されたと考えられる。さらに, 根子岳火山体の形成時期には, 初期火山体の形成も継続している。このことから, 異なる組成変化過程をおこなったマグマ供給系が四阿火山の直下に同時期に共存していたと考えられる。今後, マグマ供給系の時間変化について明らかにするために斑晶鉱物化学組成や同位体組成などのデータを充実させていく必要がある。

ま と め

1. 四阿火山は, 噴出物の分布と地形の開析の程度, 活動年代および全岩化学組成から, 3つの火山体(初期火山体, 根子岳火山体, 浦倉山火山体)および四阿火山から区別される鳴岩火山に分けられる。
2. 四阿火山および鳴岩火山において14試料の K-Ar 年代測定を行った。その結果, 四阿火山の初期火山体から $0.81 \pm 0.03 \sim 0.57 \pm 0.03$ Ma, 根子岳火山体から $0.69 \pm 0.01 \sim 0.67 \pm 0.01$ Ma, 浦倉山火山体から $0.49 \pm 0.01 \sim 0.46 \pm 0.01$ Ma, 鳴岩火山から 0.29 ± 0.01 Ma という K-Ar 年代が得られた。
3. 四阿火山は約 80 万年前に初期火山体が活動を開始し, デイサイトと玄武岩質安山岩の活動による独立した山体が形成された。初期火山体の活動が継続する中, 約 70 万年前には, 初期火山体の西斜面でデイサイトの火山活動が発生し(根子岳火山体の活動), 数万年間で山体が形成された。初期火山体は約 55 万年前まで活動が継続した。その後, 5 万年程度の活動休止期を挟み, 約 50 万年前には, 浦倉山周辺で安山岩の火山活動が発生した(浦倉山火山体の活動)。この火山体の活動は約 45 万年前には終息した。四阿火山の山頂部の環状の崩壊地形は, 初期火山体と根子岳火山体の形成後の約 55~50 万年前の間に両火山体の北東方向に開いた崩壊地形が形成され, 浦倉山火山体形成後の約 45 万年前以降に, 浦倉山火山体の西側開いた崩壊地形が形成された。最後に, 約 30 万年前には, 四阿火山の北西方において小規模な火山体(鳴岩火山)が形成された。

謝 辞

本研究を進めるにあたり, 産業技術総合研究所地質情報研究部門の大石雅之博士には, 本論文をまとめる際に数多くの有益な助言をいただいた。全岩化学組成分析および K-Ar 年代測定は, 平成 22 年度の経済産業省原子力安全・保安院(現 原子力規制委員会原子力規制庁)からの受託研究「地層処分に係る地質評価手法等の整備」の成果の一部を使用した。林野庁北信森林管理署および吾妻森林管理署には入林許可申請, 中部地方環境事務所には岩石の採取許可申請の際にお世

話になった。山形大学の伴 雅雄教授および電力中央研究所の土志田潔主任研究員, 編集委員の富山大学の石崎泰男准教授からの建設的なご助言によって, 本稿は大幅に改善された。上述した方々に感謝しここに謝意を表します。

文 献

- Gill, J. B., 1981, *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Springer-Verlag, 390p.
- 早川由紀夫(Hayakawa, Y.), 1983, 草津白根火山の地質。地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **89**, 511-525.
- 早津賢二・河内晋平(Hayatsu, K. and Kawachi, S.), 1997, 妙高火山群とその周辺の火山岩の K-Ar 年代。信州大学教育学部紀要 (*Mem. Fac. Educ. Shinshu Univ.*), **92**, 117-128.
- 金子智幸・山崎正男・佐藤博明(Kaneko, T., Yamazaki, M. and Sato, H.), 1976, 飛騨山脈に分布する高原火砕流堆積物について。火山第 2 集(*Bull. Volcanol. Soc. Japan, 2nd Ser.*), **21**, 127-128.
- 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.
- 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.
- 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.
- 松本哲一(Matsumoto, A.), 1989, K-Ar 年代測定におけるカリウム定量法の改良。地調月報(*Bull. Geol. Surv. Japan*), **40**, 65-70.
- 松本盆地団体研究グループ(Matsumoto Basin Collaborative Research Group), 1972, 松本盆地の第四系地質の概観—松本盆地の形成過程に関する研究(1)—。地質学論集(*Mem. Geol. Soc. Japan*), no. 7, 297-304.
- 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.
- Miyashiro, A., 1974, Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *Amer. Jour. Sci.*, **274**, 321-355.
- 三宅康幸(Miyake, Y.), 2006, 島弧横断火山活動と海洋プレートの沈み込み, 概説。日本地質学会編, 日本地方地質誌 4: 中部地方(*Monograph on Geology of Japan, Vol. 4 Chubu*), 朝倉書店(Asakura Publ.), 462-463.
- 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・西来邦章・宝田晋治・星住英夫・石塚吉浩・伊藤順一・川邊禎久・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 (3rd Edition)*), No.11, 地質調査総合センター(Geol. Surv. Japan).
- 中山茂樹(Nakayama, S.), 1978, 碓氷川流域の河岸段丘。駒澤地理(*Komazawa Geography*), **14**, 245-251.
- 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」および同説明書(*Geology of the Suzaka District. With Geological Sheet Map at 1: 50,000*), 地質調査所(Geol. Surv. Japan), 75p.
- 斉藤尚人・クリスタル・アッシュ(大町 APm, BP)研究会(Saito, N. and The "Crystal Ash" Layers Research Group), 1996, 中部

- 日本における中期更新世の指標テフラ. 第四紀研究(*Quatern. Res.*), **35**, 339-345.
- 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.
- 竹下欣宏・田辺智隆(Takeshita, Y. and Tanabe, T.), 2010, 四阿火山南東麓の中部更新統, 孺恋層群から見つかった古期御岳火山起源のテフラ. 地球科学(*Earth Sci. (Chikyu Kagaku)*), **64**, 1-9.
- 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, 菅平から孺恋高原にかけて分布する中部更新統. 第四紀(*Daishiki*), **25**, 47-56.
- 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.
- 宇都浩三・R. M. コンレー・平田岳史・内海 茂(Uto, K., Conrey, R. M., Hirata, T. and Uchiumi, S.), 1995, 地質調査所における同位体希釈法 K-Ar 年代年代測定システムの精度向上-質量分析計自動計測制御およびピペット方式スパイク導入法の適用-. 地調月報(*Bull. Geol. Surv. Japan*), **46**, 239-249.
- 八木貞助(Yagi, T.), 1941, 上高井地質誌(*Regional Geology of Kamitakai*). 上高井教育会(Kamitakai educational meeting)*, 230p.
- 矢口裕之(Yaguchi, H.), 1999, 群馬県北西部のテフラとローム層の層序. 財団法人群馬県埋蔵文化財調査事業団研究紀要(*Bull. Gunma Archaeol. Res. Found.*), **16**, 61-90.
- 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(*Japan Assoc. Quatern. Res. Meet. Abstr.*), **20**, 120-121.

*English translation from the original written in Japanese

付 録 年代測定用試料の採取位置と岩石記載. 緯度経度は世界測地系(JGD2000)に基づく.

- Az-YN1** 米子溶岩層(単斜輝石含有斜方輝石デイサイト)
位置: 米子不動尊南西 100 m 地点, 標高 1440 m. 36°34'05"N, 138°24'16"E.
斑晶: 斜長石(1.0 mm; 自形~半自形). 斜方輝石(0.4 mm; 自形~半自形). 単斜輝石(0.4 mm; 自形~半自形). 輝石斑晶はほとんど目立たない. 石基: インターサタル組織で変質鉱物は見られない.
- Az-Ko1** 小池山溶岩層(斜方輝石単斜輝石玄武岩質安山岩)
位置: 大横川左岸, 標高 1050 m 地点. 36°29'49"N, 138°29'01"E.
斑晶: 斜長石(1.5 mm; 自形~半自形). 単斜輝石(0.8 mm; 半自形~自形). 斜方輝石(0.6 mm; 自形~半自形). 輝石斑晶は比較的密に存在している. 石基: インターサタル組織で変質鉱物は見られない.
- Az-lb1** 茨木溶岩類(斜方輝石単斜輝石玄武岩質安山岩)
位置: 茨木山北東 1.4 km 地点, 標高 1330 m. 36°32'29"N, 138°27'46"E.
斑晶: 斜長石(0.8 mm; 自形~半自形). 単斜輝石(0.6 mm; 自形~半自形). 斜方輝石(0.6 mm; 自形~半自形). 輝石斑晶は比較的密に存在している. 石基: ハイアロピリティック組織で変質鉱物は見られない.

晶は比較的密に存在している. 石基: ハイアロピリティック組織で変質鉱物は見られない.

- Az-Ot1** 大谷溶岩層(斜方輝石単斜輝石安山岩)
位置: 大谷不動東方 150 m 地点, 標高 1450 m. 36°33'50"N, 138°22'32"E.
斑晶: 斜長石(1.5 mm; 自形~半自形). 単斜輝石(0.8 mm; 自形~半自形). 斜方輝石(0.8 mm; 自形~半自形). 斜長石斑晶は定向配列している. 石基: ハイアロオフィティック組織で変質鉱物は見られない.
- Az-Kg1** 神川溶岩層(斜方輝石単斜輝石安山岩)
位置: 唐沢ノ滝, 標高 1230 m. 36°31'12"N, 138°20'15"E.
斑晶: 斜長石(1.0 mm; 自形~半自形). 単斜輝石(0.8 mm; 自形~半自形). 斜方輝石(0.6 mm; 自形~半自形). 破片状の斜長石斑晶が散在する. 石基: ハイアロオフィティック組織で変質鉱物は見られない.
- Az-Az1** 四阿溶岩類(斜方輝石単斜輝石安山岩)
位置: 四阿山東方 700 m 地点, 標高 2160 m. 36°32'31"N, 138°25'13"E.
斑晶: 斜長石(1.2 mm; 自形~半自形). 単斜輝石(0.8 mm; 自形~半自形). 斜方輝石(0.6 mm; 自形~半自形). 斜長石斑晶は丸みを帯びたものが多い. 石基: ハイアロピリティック組織で変質鉱物は見られない.
- Az-Az2** 四阿溶岩類(斜方輝石単斜輝石安山岩)
位置: 四阿山南西 5.3 km 地点, 標高 1360 m. 36°30'17"N, 138°22'32"E.
斑晶: 斜長石(0.6 mm; 自形~半自形). 単斜輝石(0.6 mm; 半自形~自形). 斜方輝石(0.5 mm; 半自形~自形). 破片状の斜長石斑晶が散在する. 石基: ハイアロピリティックで変質鉱物は見られない.
- Az-Nk2** 大明神沢溶岩(斜方輝石含有単斜輝石かんらん石玄武岩質安山岩)
位置: 大明神沢右岸, 標高 1340 m. 36°31'18"N, 138°21'22"E.
斑晶: 斜長石(0.8 mm; 自形~半自形). かんらん石(0.5 mm; 自形~半自形). 単斜輝石(0.5 mm; 自形~半自形). 斜方輝石(0.5 mm; 自形~半自形). 石基: インターグラニューラー組織で変質鉱物は見られない.
- Az-Az3** 六方石溶岩層(斜方輝石単斜輝石デイサイト)
位置: 根子岳北方 1.3 km 地点, 標高 1940 m. 36°33'41"N, 138°23'40"E.
斑晶: 斜長石(0.6 mm; 自形~半自形). 単斜輝石(0.5 mm; 自形~半自形). 斜方輝石(0.4 mm; 自形). 輝石斑晶が目立たない. 石基: ハイアロオフィティック組織で変質鉱物は見られない.
- Az-Az4** 根子溶岩類(斜方輝石単斜輝石デイサイト)
位置: 根子岳北西 600 m 地点, 標高 2130 m. 36°33'13"N, 138°23'29"E.
斑晶: 斜長石(1.0 mm; 自形~半自形). 単斜輝石(0.5 mm; 自形~半自形). 斜方輝石(0.5 mm; 自形~半自形). 斜長石斑晶は丸みを帯びているものが多い. 輝石斑晶が目立たない.

い。石基：インターサタル組織で変質鉱物は見られない。

Az-NT1 仁田沢溶岩層(斜方輝石単斜輝石安山岩)

位置：バラキ湖北東 2.3 km 地点，標高 1130 m. 36°33′33″N, 138°29′50″E.

斑晶：斜長石(1.0 mm; 自形～半自形)。単斜輝石(0.8 mm; 自形～半自形)。斜方輝石(0.6 mm; 自形～半自形)。斜長石斑晶は汚濁帯や溶融形を呈するものが多い。石基：ハイアロピリティック組織で変質鉱物は見られない。

Az-Yk1 米子奇妙溶岩類(斜方輝石単斜輝石安山岩)

位置：奇妙山南方 500 m 地点，標高 1430 m. 36°34′34″N, 138°24′18″E.

斑晶：斜長石(1.5 mm; 自形～半自形)。単斜輝石(0.8 mm; 自形～半自形)。斜方輝石(0.6 mm; 自形～半自形)。斜長石斑晶には汚濁帯や溶融形を呈するものが認められる。輝石斑晶が目立つ。石基：インターサタル組織で変質鉱物は見られない。

Az-Uk1 浦倉溶岩層(斜方輝石単斜輝石安山岩)

位置：浦倉山南方 800 m 地点，標高 2110 m. 36°33′34″N, 138°25′36″E.

斑晶：斜長石(1.5 mm; 自形～半自形)。単斜輝石(0.8 mm; 自形～半自形)。斜方輝石(0.8 mm; 自形～半自形)。斜長石斑晶には汚濁帯や溶融形を呈するものが認められる。石基：ハイアロピリティック組織で変質鉱物は見られない。

Az-Nk1 鳴岩溶岩類(斜方輝石含有かんらん石単斜輝石安山岩)

位置：米子不動里宮南西 1.5 km，標高 800 m. 36°36′12″N, 138°22′15″E.

斑晶：斜長石(0.8 mm; 自形～半自形)。単斜輝石(0.6 mm; 自形～半自形)。かんらん石(0.5 mm; 自形～半自形)。斜方輝石(0.5 mm; 自形～半自形)。かんらん石斑晶が比較的目立つ。石基：インターサタル組織で変質鉱物は見られない。

(要 旨)

西来邦章・竹下欣宏・田辺智隆・松本哲一，2014，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，120，89-103。(Nishiki, K., Takeshita, Y., Tanabe, T. and Matsumoto, A., 2014, K-Ar ages for lavas of Azumaya volcano, central Japan: Reexamination of volcanic history of Azumaya volcano. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 120, 89-103.)

四阿火山において地質調査，K-Ar 年代測定および全岩化学組成分析を行い，火山活動史の再検討を行った。本火山は噴出物の分布と地形の開析の程度差，活動年代および全岩化学組成から，3つの火山体(初期火山体，根子岳火山体，浦倉山火山体)からなる。本火山の活動は，約 80 万年前に開始した(初期火山体の活動)。約 70 万年前には，根子岳周辺でデイサイトの火山活動が発生し(根子岳火山体の活動)，数万年間で山体が形成された。初期火山体は約 55 万年前まで活動が継続したのち，5 万年程度の活動休止期を挟み，約 50 万年前には，浦倉山周辺で安山岩の火山活動が発生した(浦倉山火山体の活動)。この火山体の活動は約 45 万年前には終息した。そして，約 30 万年前には，四阿火山の北西方において小規模な火山体(鳴岩火山)が形成された。

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>