

阿蘇火山北西部に分布する Aso-4 火砕流堆積物、
弁利サブユニットの層序と岩石学的特徴関 琢磨^{*,**}・荒川洋二^{***}・新村太郎^{****}・大鹿淳也^{*****}・
森 康^{*****}・池端 慶^{***}

(2015 年 8 月 24 日受付, 2016 年 2 月 10 日受理)

Stratigraphy and Petrological Characteristics of the Benri Subunit of the Aso-4
Pyroclastic Flow Deposits in the Northwestern Part of the Aso Volcano, JapanTakuma SEKI^{*,**}, Yoji ARAKAWA^{***}, Taro SHINMURA^{****}, Junya OSHIKA^{*****},
Yasushi MORI^{*****} and Kei IKEHATA^{***}

We conducted detailed stratigraphic, petrographic and petrochemical investigations on the Benri subunit which is the products by one of the caldera-forming eruption cycles of Aso-4 pyroclastic flow, Aso volcano, central Kyushu, Japan. The Benri subunit is limitedly distributed in the outer side of the northwestern part of Aso volcano. It is mainly composed of scoria, pumice and banded pumice for juvenile fragments, and andesitic lithic fragments (accessory) set in a matrix. The Benri subunit is divided into seven units (Unit1~Unit 7), based on the amount and shape of essential fragments, and on the characteristics of lithic fragments and matrix. As a whole, the upward transition of deposits from pumice-rich (non-welded) to scoria-rich (weakly-welded), and to pumice-rich again was recognized in the units. Petrographic observations and mineral chemistries, particularly for wide range of the anorthite content of plagioclase (An₄₀₋₉₀) in most scoriae, pumices and banded pumices, provide evidences for magma mixing with different amounts of mafic and felsic components. Pumices in some units are characterized by low anorthite content of plagioclase (An₃₀₋₅₀) which are similar to those in the silicic eruption products at the initial stage of the Aso-4 cycle. Whole-rock major and some trace element contents of scoriae, pumices and banded pumices show linear variation trends between two assumed (mafic and felsic) end members. These results suggest the magma mixing as an important process for producing the magmas of Benri subunit.

These observations and results suggest that, before the eruption producing the Benri unit, compositionally zoned (stratified) magma layers had been formed between mafic and felsic end member magma layers in the magma chamber. The eruption sequence of the composite magmas is assumed to have changed as from felsic magma dominant to mafic magma dominant, and then felsic magma increasing again.

Key words: Aso volcano, Aso-4 pyroclastic flow, Benri subunit, scoria-pumice mixed layer, banded pumice, magma mixing

* 〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学大学院生命環境科学研究所
Graduate school of Life and Environmental Sciences,
University of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan.

** 現在所属: 〒420-8601 静岡県静岡市葵区追手町 9-6
静岡県庁
Shizuoka Prefecture Government Office, Aoi-ku, Shizuoka,
Shizuoka 420-8601, Japan.

*** 〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1
筑波大学生命環境系
Faculty of Life and Environmental Sciences, University
of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki 305-8572, Japan.

**** 〒862-8680 熊本県熊本市中央区大江 2-5-1
熊本学園大学経済学部

Faculty of Economics, Kumamoto Gakuen University, Oe
2-5-1, Chuo-ku, Kumamoto, Kumamoto 862-8680, Japan.

***** Earth Resources Faculty, China University of Geosciences
(Wuhan), Lumo Road 388, Hongshan District, Wuhan,
Hubei, P. R. China.

***** 〒805-0071 福岡県北九州市八幡東区東田 2-4-1
北九州市立自然史・歴史博物館
Kitakyushu Museum of Natural History and Human
History, 2-4-1 Higashida, Yahatahigashi-ku, Kitakyushu-
shi, Fukuoka 805-0071, Japan.

Corresponding author: Yoji Arakawa
e-mail: yaraka@geol.tsukuba.ac.jp

1. はじめに

島弧や大陸縁部の沈み込み帯火山,あるいは大陸内部の火山における限られた期間の大量の珪長質マグマの噴火は,カストロフィックな活動であり,しばしば大規模カルデラの形成を伴うことがある.それらの火山噴出物の詳細な層序の記載や,本質物質の岩石学的・地球化学的研究は,カルデラ形成期のマグマ溜りを含むマグマ供給系の構造やマグマ噴火の形態および時間的推移,さらにはカルデラの形成機構などに関する多くの情報を与えてくれる(例えば,Hildreth, 1981; Sparks and Marshall, 1986; Musselwhite *et al.*, 1989; 津久井・荒牧, 1990; Duffield and Ruiz, 1992; Suzuki-Kamata *et al.*, 1993; Hunter, 1998, Best and Christiansen, 2001; Jellinek and DePaolo, 2003).カルデラ形成を伴った噴火では,多くの場合,珪長質マグマの噴出が主体をなすが,珪長質から苦鉄質等,組成の異なったマグマの噴出が見られる場合もある.この場合は,噴出物の層序から噴火のプロセスの推定,また溶岩や火砕岩中の本質物質からマグマ供給系(マグマ溜まりの組成構造,あるいは複数の異なったマグマの存在など)や地下構造などをより詳細に探ることができる.

阿蘇カルデラは中部九州に位置する25 km×18 kmの大規模カルデラである.阿蘇火山は古川・他(2009)により,カルデラ形成期を中心に,先カルデラ火山活動期,カルデラ形成期,後カルデラ火山活動期に区分されている.カルデラ形成に至るまでに,火砕流を伴う大規模な噴火が270~90 kaの間に4回繰り返されたと考えられており,その堆積物は古いものから順にAso-1~Aso-4に分けられている(小野・渡辺,1985).中でも最新(90 ka)のAso-4火砕流噴火噴出物は,日本国内で最大の噴出量(>600 km³)であったと考えられている(町田・新井,2003).Aso-1~Aso-4火砕流堆積物は,珪長質マグマから苦鉄質マグマといった噴火サイクルが一部に見られることから,小野・渡辺(1983)により,珪長質マグマと苦鉄質マグマの2層からなる“成層マグマ溜り”が考えられている.また,Hunter(1998)は,Aso-1~Aso-4を通した岩石化学的研究に基づいたマグマの生成過程,およびマグマ供給系の推移に関するモデルを提唱した.さらに最近,Kaneko *et al.*(2007)はAso-4噴出物全体にわたり,軽石,スコリアなどの本質物質の主要鉱物の化学組成および全岩化学組成,さらにマグマの物理化学条件の推定などに基づいた詳細な研究を行い,2回の苦鉄質マグマの噴出を含む一連のマグマ供給系の変化を推定している.また,Miyoshi *et al.*(2011)はカルデラ形成期から後カルデラ火山岩類について,岩石学的な成因関係を論じている.

しかしながら,従来の研究では,苦鉄質本質物質(ス

コリア)や軽石を含む地層等の詳細な層序,および各層の具体的な記載は示されておらず,また苦鉄質,珪長質両マグマ噴出の推移については必ずしも明瞭にはされていない.今回筆者らは,熊本県菊池市北東にある弁利地域(西側のカルデラ壁の北西約10 km)に露出する珪長質および苦鉄質本質物質(本質岩片)を含むAso-4火砕流中期の噴出物(後述の弁利スコリア流堆積物:Watanabe(1978)に相当)に焦点を当て研究を行った(Figs. 1, 2).この露頭の一部は,最近の土地整備(2005~2006)により新たに得られたものであり,保存状態も良く,スコリア,軽石,縞状軽石などを含む堆積物を詳細に観察できる.この新しい露頭を含めた周辺地域の露頭の層序の観察結果より,含有する上記本質物質の形状や量比が上下方向において,必ずしも単調な変化を示していないことが指摘されている(大鹿・他,2007;関・他,2011).従って,この地域の火砕流堆積物は,珪長質マグマを起源とする軽石流堆積物が大半を占めるAso-4火砕流堆積物において,珪長質マグマと苦鉄質マグマとの成因的関連やマグマ供給系,およびそれらのマグマの噴出様式などを探ることのできる重要な地層であるといえる.

そこで本論文では,この新露頭も含めたスコリアと軽石が混在する火砕流堆積物(弁利サブユニットと呼称:後述)の詳細な層序の記載と,本質物質であるスコリアと軽石,縞状軽石の岩石学的記載,EPMAによる斑晶鉱物の化学組成分析,およびXRFによる全岩化学組成分析,また一部の試料に対してSr同位体比の分析を行い,それらの結果から噴出時のマグマ供給系(あるいはマグマ溜りの組成構造),およびその噴出の推移の推定を試みたので,ここに報告する.

2. 地質概略

阿蘇火山は,南北25 km,東西18 kmのカルデラと中央火口丘群からなる活火山である(小野・渡辺,1985).その基盤岩は,新第三紀末から第四紀前期の火山岩や白亜紀花崗岩,中・古生代の堆積岩と変成岩などである(例えば,小野・渡辺,1983;三好・他,2011).火山活動としては,カルデラ形成期に4回の大規模火砕流噴火があったと推定されており,Aso-1(噴出量50 km³,噴出年代266±14 ka),Aso-2(噴出量50 km³,噴出年代141±5 ka),Aso-3(噴出量>150 km³,噴出年代123±6 ka),Aso-4(噴出量>600 km³,噴出年代90±4 ka.)と区分されている(小野・他,1977;松本・他,1991).また,これらの4回の大規模噴火の間,およびそれ以降にも降下火砕物からなる小規模噴火が存在したことが確認されている(星住,1990;宮縁・他,2003;古川・他,2006).Aso-4火砕流噴火以降

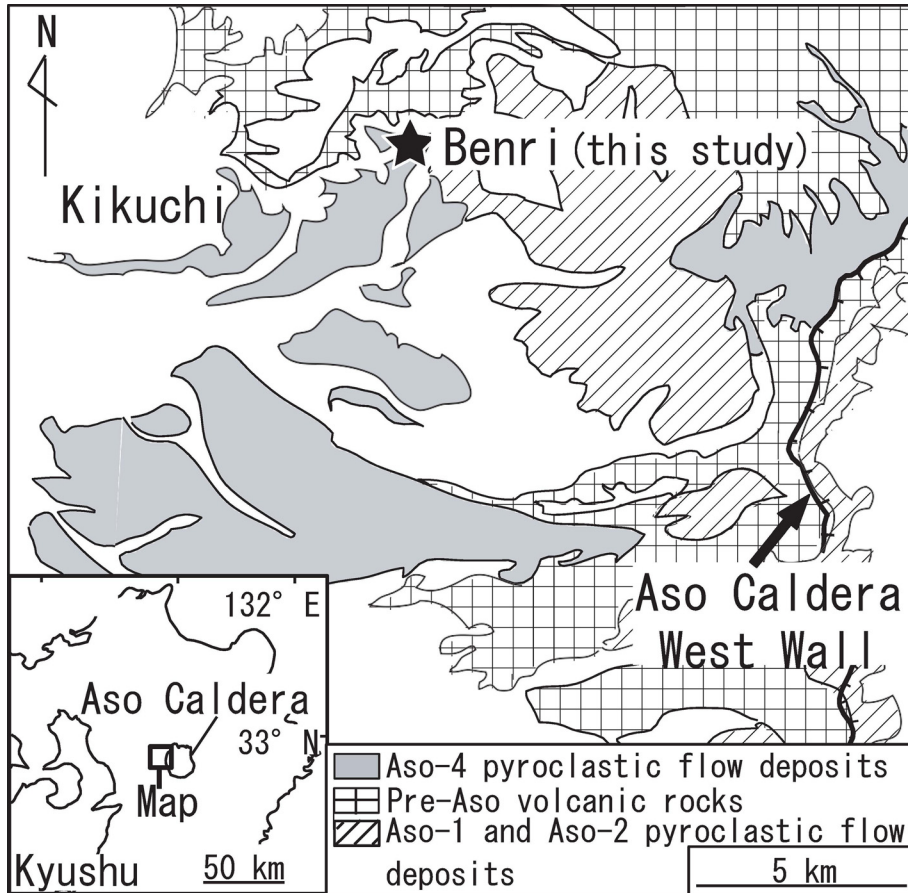


Fig. 1. Simplified geological map of the northwestern part of the Aso volcano modified from Hoshizumi *et al.* (2004). The star shows the location of the studied area (see Fig. 2).

は中央火口丘群の活動が続いており、現在は中岳のみが活動している。

Aso-4 火砕流堆積物は、カルデラを中心に多方向に分布しており、いくつかのサブユニットに分類されている。それらの分類は、Smith and Bailey (1966) などに従い、1回の噴火、あるいは複数回の噴火により生じた火砕流堆積物をサブユニットと定義し、主に岩相の特徴、色調、組織、粒形、鉱物種、溶結状態などを基準に区分されてきた(小野, 1965; 小野・他, 1977; Watanabe, 1978)。これまでの研究における対比図を Fig. 3 に示す。カルデラの西側は、Watanabe (1978) により詳細に分類されている。Watanabe (1978) の分類では下位より、小谷白色軽石流堆積物 (>5 km³)、肥猪火山灰流堆積物 (1 km³)、鳩平軽石流堆積物 (>2 km³)、八女軽石流堆積物 (>35 km³)、用木灰色軽石流堆積物 (>4 km³)、弁利スコリア流堆積物 (0.5 km³)、鳥栖オレンジ軽石流堆積物 (10 km³)、九ノ峰

スコリア流堆積物 (0.2 km³) の8つの層が区分されている。カルデラの北側の宮原地域は下部から、阿蘇-4A、阿蘇-4T、阿蘇-4Bの3つ(鎌田, 1997)、東側の竹田地域では阿蘇-4A、阿蘇-4Bの2つのサブユニットに分けられている(小野・他, 1977)。最近 Kaneko *et al.* (2007) は、上記研究結果を踏まえ、Aso-4 噴出物全体の分類を行っている。その分類では、下位から 4I-1, 4I-2, 4I-3, 4II-1, 4II-2, 4II-3 の6つのサブユニットに区分されている。これらの区分では、カルデラの西側の噴出物(Watanabe, 1978)と詳しい対比が示されている(Fig. 3)。一方、北側および東側では、小野・他(1977)および鎌田(1997)の分類に基づく4AがKaneko *et al.* (2007)の4I-1に、4Bが4II-2に対比されているが、鎌田(1997)の分類による4Tの一部は、4Bをはさむ形で層序区分等が必ずしも整合的ではない(Fig. 3)。

本論の研究対象である火砕流堆積物は、カルデラ西側

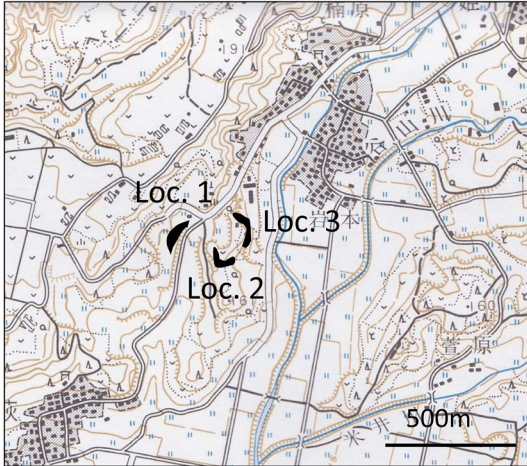


Fig. 2. Location of the outcrops of the Benri subunit (Aso-4 pyroclastic flow). Loc. 1-3 are the sites of outcrops and sampling. The map is from 1: 25,000 Kikuchi (Geological Survey of Japan).

に分布する弁利スコリア流堆積物 (Watanabe, 1978) に相当すると考えられる。実際にはスコリアのみならず軽石も含むため、ここでは Watanabe (1978) の区分を踏襲し、“弁利サブユニット”と呼ぶことにする。この弁利サブユニットは、上述の Kaneko *et al.* (2007) の区分の 4I-3 に相当すると考えられる。Watanabe (1978) では、弁利サブユニットはカルデラ壁北西側の弁利地域にのみ露出し、スコリアと灰色軽石、縞状軽石、石質岩片を含むスコリア流堆積物であると報告されている。その報告の中で、弁利スコリア流堆積物 (弁利サブユニット) の特徴として、下部の基質が非溶結状態であり、上部の基質が黒色を呈し、溶結していることや、スコリアの量比が上位に向かって増加することが挙げられている。本地域の露頭では、全層で量比は異なるもののスコリアと軽石が共存している。本地域の露頭下部における黒色スコリアや縞状軽石の存在は、弁利スコリア流堆積物 (弁利サブユニット) の下位の用木灰色軽石流堆積物にも見られる特徴であるが、露頭上部のスコリア優勢ユニットと明瞭な境界が認められず漸移的な堆積物と認識されるため、弁利サブユニットの一部 (下部) と判断した。また、本地域で確認された露頭の最上部には、軽石が含まれる層が存在するが、上位の鳥栖オレンジ軽石流堆積物の特徴であるオレンジ色の軽石や火山豆石様の粘土鉱物の集合体 (Watanabe, 1978) は見られない。従って、本調査地域の堆積物の分布は、Watanabe (1978) の弁利スコリア流堆積物 (あるいはその主要部) に相当すると判断される。以下、弁利サブユニットとして記載、議論する。

Watanabe (1978)	Kaneko <i>et al.</i> (2007)	Ono <i>et al.</i> (1977) (O) and Kamata (1987) (K)
Kunomine scoria flow	4II-3	a part of 4T (K)
Tosu orange pumice flow	4II-2	4B (O and K)
Benri scoria flow	4II-1	a part of 4T (K)
Motoigi grey pumice flow	4I-3	a part of 4T (K)
Yame pumice flow	4I-2	
Hatobira pumice flow	4I-1	4A (O and K)
Koei ash flow		
Oyatsu white pumice flow		

Fig. 3. Comparison of stratigraphy and division of pyroclastic flow deposits in the Aso-4 eruptive cycle (modified from Kaneko *et al.*, 2007).

Aso-4 火砕流の噴火は、珪長質マグマから苦鉄質マグマの噴出へ遷移するサブサイクルが大きく 2 回存在したと考えられている (小野・渡辺, 1983)。前半のサブサイクルは、小谷白色軽石流から弁利スコリア流 (4I-1~3; Kaneko *et al.*, 2007) までとされ、後半は鳥栖オレンジ軽石流から九ノ峰スコリア流 (4II-1~3; Kaneko *et al.*, 2007) までと考えられている。このような 2 回のサイクルの中で、弁利サブユニットは 1 回目の噴火サイクルの中の後半の時期の噴火堆積物に相当し、マグマ供給系、あるいはマグマ溜り深部の苦鉄質マグマが噴火できる状況であったものと推測される。

3. 弁利サブユニットの層序記載

3-1 露頭記載

本研究の調査地域は、熊本県菊池市弁利である (Fig. 1)。この地域の露頭を調査し、その結果を柱状図として Fig. 4 に示す (各地点の柱状図と総合柱状図)。確認できた弁利サブユニットの厚さは全体で約 23.5m である。一部の露頭は切通しとなっており、連続的な観察が可能である (Fig. 5a)。本研究では、Watanabe (1978) において単一のスコリアと軽石の混合層として扱われてきた弁利スコリア流堆積物 (弁利サブユニット) を、噴出物の特徴やその上下変化をより詳しく判別する目的で、含有する岩石種やその量比、大きさ (形状および摩耗度)、基質の色や種類を基に、下位よりさらに 7 つのユニット (Unit 1~7) に新たに区分した。各ユニットの詳細な岩相を下記に示す。

Unit 1 (軽石-縞状軽石ユニット) は、層厚 2~3m で非溶結の軽石を主体とした堆積物であり、Loc. 2, 3 で確認できた (Fig. 5b)。無層理で、含まれる本質物質の淘汰は悪い。基質は白~灰色を呈し、粒径 1mm 以下の自形の有色鉱物斑晶が含まれている。含まれる軽石は、白~灰色を呈し、最大長径 10cm で、円磨されている。この層の下部に縞状軽石を含むことが、Unit 1 の特徴である。

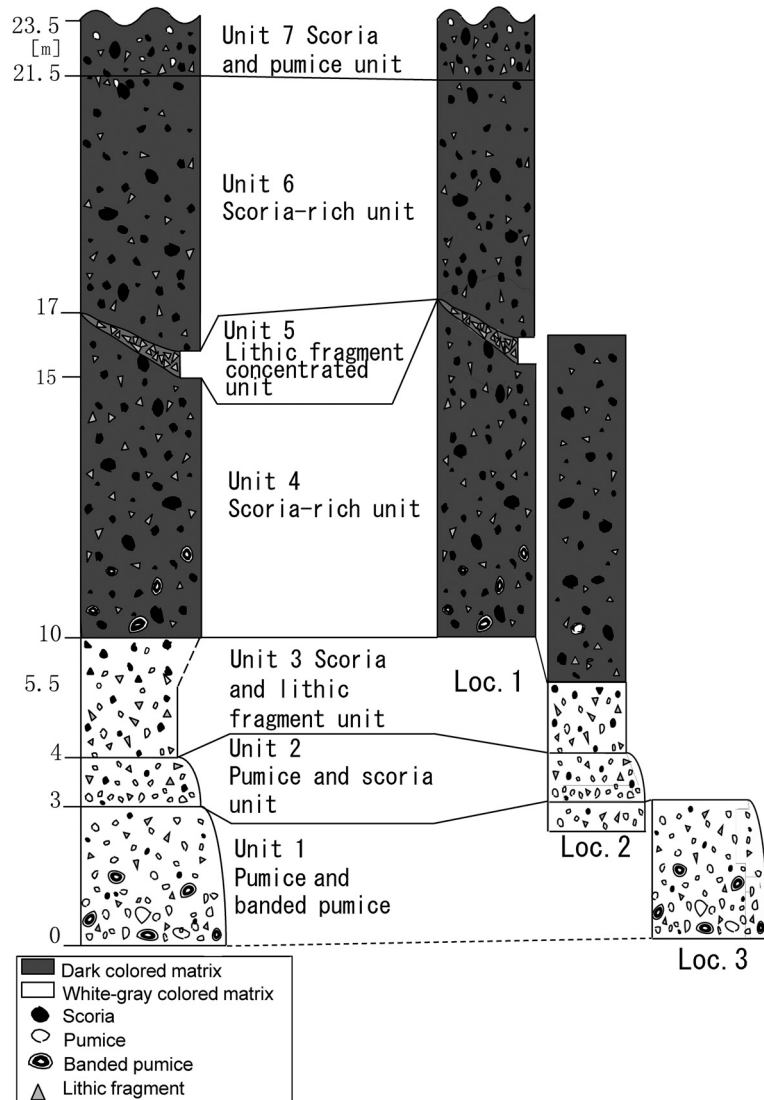


Fig. 4. Columnar sections of the Benri subunit (Aso-4 pyroclastic flow) indicating lithological characteristics of the seven units (Units 1-7). Simplified integrative section is in the left.

その最大長径は 15 cm 前後で、白～灰色軽石と比較して大きい。暗灰～黒色部と灰～白色部を何層にも包み込む形状や帯状に白色部と黒色部が接する形状の縞状軽石が確認できた (Fig. 5c)。ごく少量ではあるが、粒径 0.5～1 cm の発泡が悪いスコリアや粒径 0.5～2 cm の安山岩質角礫も含まれる。この特徴は、弁利層の下位の火砕流堆積物とされている用木灰色軽石流 (Watanabe, 1978) とは異なる。含まれる本質岩片および角礫の量比は多いものから、軽石、縞状軽石、スコリア、安山岩質角礫である。層の上部にかけて、軽石の量比の減少が見られる。また、

Unit 1 はこの地域で確認できる弁利サブユニットの最下部に位置すると考えられるが、その下位の地層ここでは確認されない。また、火砕流堆積物の本体部に比べて細粒な基質で構成される基底細粒層 (Layer 2a; Sparks *et al.*, 1973) の特徴も見られない。

Unit 2 (軽石-スコリアユニット) は、層厚約 1 m で、非溶結の軽石、スコリアを含む堆積物である (Loc. 2)。基質は、灰～暗灰色を呈し、若干風化している。含まれる岩石種 (粒径 1 cm 以上) は、多いものから軽石、スコリア、安山岩質角礫である。軽石は白～灰色を呈し、最大

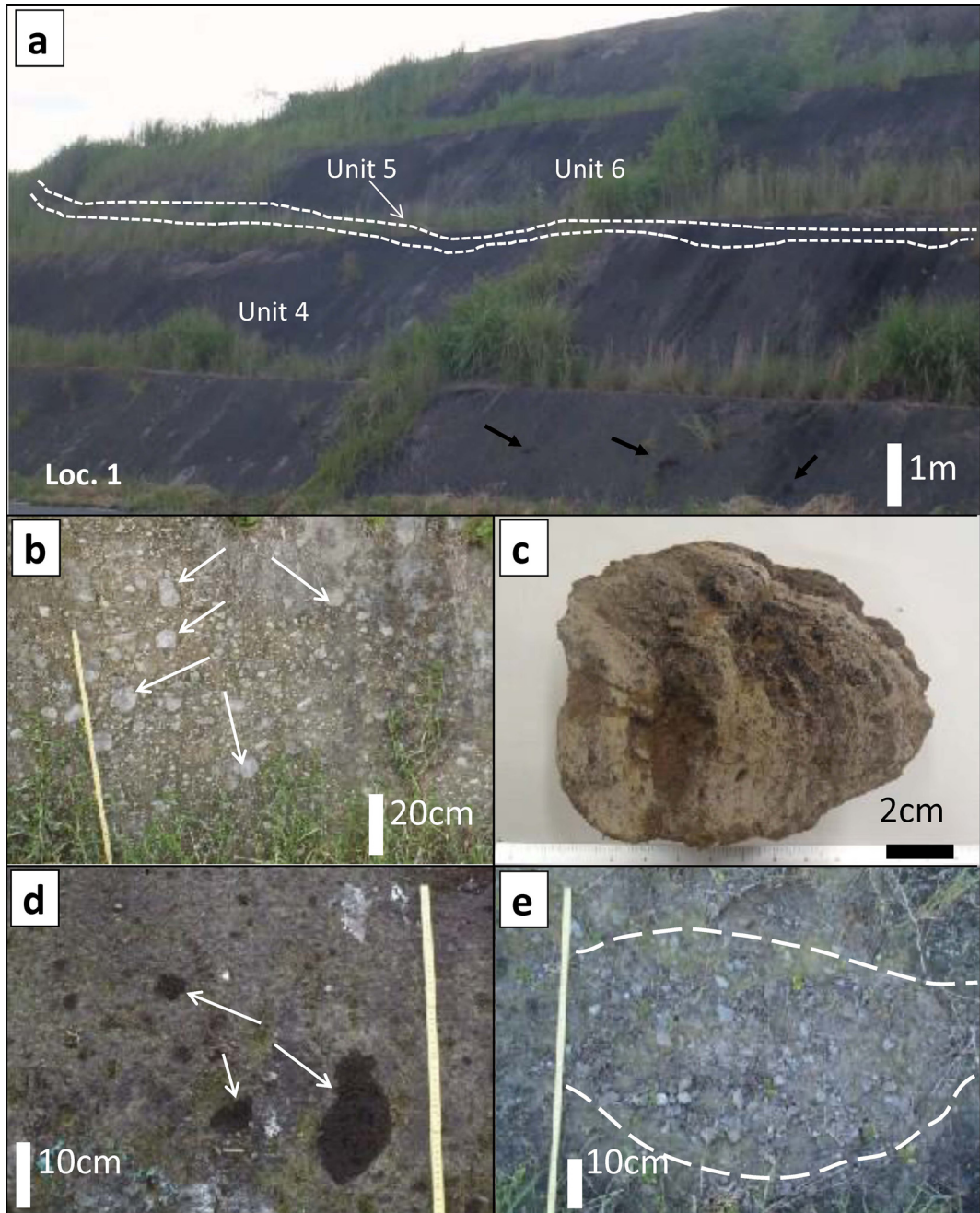


Fig. 5. Photographs of the Benri deposits (Aso-4 pyroclastic flow). (a) Outcrop of the scoria-rich deposits (Loc. 1, Units 4-6). White broken lines show unit boundaries between Unit 4-6. Black arrows indicate fragments of scoria within the pyroclastic matrix. (b) Unit 1 (Pumice and banded pumice unit). The arrow indicates the pumice fragment. (c) Banded pumice included in Unit 1. (d) Unit 4 (Scoria-rich unit). The arrow shows sub-rounded scoria. (e) Unit 5 (Lithic fragment concentrated unit). Small fragments of andesite (sub-rounded in shape) are concentrated.

長形は 6 cm と Unit 1 の軽石より小さく、量も少ない。また球状～亜円礫状の形態を示す。スコリアは最大長径 6 cm のものが少量含まれるが、多くは 2 cm 以下で角礫～亜角礫状である。また安山岩質角礫は、1～2 cm の大きさである。

Unit 3 (スコリア-石質岩片ユニット) は、層厚 1.5～2 m の非溶結の堆積物である (Loc. 2 で確認)。Unit 2 との境界は漸移的であるが、軽石よりもスコリアと安山岩質角礫を多く含むといった特徴がある。スコリアと角礫の最大長径は 6 cm 程度で、多くは 1～3 cm で淘汰は悪い。軽石は少量含まれ、多くは 1 cm 以下である。また上部に向かいスコリアの量比や大きさが増加する傾向がある (Fig. 4)。

Unit 4 (スコリア濃集ユニット) は、層厚約 8 m のスコリアを主体とした堆積物である (Fig. 5d)。このユニットは、Loc. 1, 2 で確認された層である。Unit 3 の層序では、下位から上位に向かってスコリアの量と大きさが増加し、軽石の量が減少する傾向が認められるため (Fig. 4)、Unit 3-4 間の境界は必ずしも明瞭ではないが、スコリア、軽石の存在量および溶結の程度で区分した。Unit 1, 2 と比較し、弱溶結の黒色～黒灰色の基質を有する点が Unit 3 と異なっている。含まれるスコリアは粒径約 5～10 cm、淘汰は悪く、多くはよく円磨されている。粒径 3～5 cm 程の安山岩質角礫を Unit 1～3 に比べ多く含む。また、Unit 4 下部に Unit 1 と同様な縞状軽石 (最大長径 18 cm) を含んでいる。この点は、Loc. 1, 2 で類似している。また、軽石はごく少量含み、多くは 5 mm 以下で円形であり、多くの場合変質している。

Unit 5 (石質岩片濃集層) は Unit 4 と 6 の間にレンズ状に狭在する (Loc. 1; Fig. 5e)。ただし、Loc. 2 では露頭ではその存在は見られなかった。Loc. 1 では、層厚 20～60 cm で水平方向に分布している。上下のユニットとの境界は必ずしも明瞭ではないが、高密度に堆積した粒径 3～5 cm の安山岩質角礫や少量の変質火山岩で構成されている。また、それらの特徴は火砕流の ground layer (Walker *et al.*, 1981) あるいは基底細粒層 (Sparks *et al.*, 1973) の特徴とは異なっている。また上下のユニットに噴出物の著しい差異が見られないが、この石質岩片濃集層は、Loc. 1 の露頭では断続的ではあるが横方向に連続するため、ユニットとして区分した。

Unit 6 (スコリア濃集ユニット) は、層厚が約 5 m の弱溶結のスコリアを主体とした堆積物である。岩質や量比、基質は Unit 4 のそれらとほぼ同様であるが、縞状軽石を含まないという特徴がある。含まれるスコリアの最大長径は約 15 cm である。粒径 3～5 cm の安山岩質角礫を Unit 4 同様に少量含む。また 1 cm 以下の軽石をごく

少量含む。

Unit 7 (スコリア-軽石ユニット) は、Unit 6 の上位に整合的に重なり、層厚が約 2 m の弱溶結の堆積物である。Unit 4 や 6 と異なりスコリアと安山岩質角礫に加え、軽石を多く含む。粒径 (楕円形の場合は長径) はスコリアが最大 10 cm、角礫が 1～4 cm、軽石が約 2～4 cm である。

3-2 主要構成物の岩石記載

調査を行った地域の弁利層の各ユニットに含まれる本質物質であるスコリア、軽石、縞状軽石の斑晶鉱物の量比および組織の特徴について Table 1 に示した。また、Aso-4 最初期の噴出物である小谷軽石流堆積物の軽石についても比較のために検討を行った。

全体的な特徴として、スコリアは全斑晶量が多く (10～32 vol.%)、軽石では少ない (2～10 vol.%)。この違いは縞状軽石の黒灰色部 (スコリア部) および灰白色部 (軽石部) でも同様であるが、これらの斑晶量比の違いは各ユニット内でもばらつきが大きいことが特徴である。まず、スコリア、軽石、縞状軽石の顕微鏡下での共通的な特徴をまとめて記述する。

スコリアは、いずれのユニットでも粒径は異なるが黒色を呈し、多くは円磨されている。主要斑晶鉱物として斜長石 (0.1～2.5 mm)、角閃石 (0.2～3.0 mm)、単斜輝石 (0.2～1.0 mm)、斜方輝石 (0.2～1.0 mm)、鉄チタン酸化物 (0.1～1.5 mm)、カンラン石 (0.1～0.4 mm) を含んでいる (Figs. 6 a, 6b)。斜長石は累帯構造 (正累帯、逆累帯、波動累帯) や汚濁帯を含んでいることがある。斑晶の量比で斜長石の次に多い角閃石の多くは、自形で他の斑晶鉱物に比べ粒径が大きく、累帯構造は一般に示さない。斜方輝石や単斜輝石は半自形～自形を示すが、それらの一部は融食されており、丸みを帯びている。これらの両輝石では、累帯構造が見られない清澄な結晶と逆累帯構造が認められる結晶が含まれている。カンラン石は、含有量は少ないが、融食形を示すことが多い。斜長石や鉄チタン酸化物、単斜輝石を含む集斑状組織も確認された。

一方、軽石は灰～白色で円磨されている。斑晶鉱物はスコリアと類似し、斜長石 (0.2～1.6 mm)、角閃石 (0.5～1.9 mm)、斜方輝石 (0.3～0.6 mm)、単斜輝石 (0.2～1.1 mm)、鉄チタン酸化物 (0.1～0.8 mm)、カンラン石 (0.1～0.4 mm) であった (Figs. 6c, 6d)。累帯構造や汚濁帯を持つ斜長石が同様に観察された。軽石は基質ガラスの組織や鉱物の形態から考えると、2 種類に分けられる。基質が繊維状のガラスで構成される場合と、そうでない場合があることが分かった (Figs. 6c, 6d)。

縞状軽石は、累带状または帯状に黒～褐色部 (スコリア部) と白色部 (軽石部) に分かれている (Figs. 5c, 6e, 6f)。主要な斑晶鉱物は他の本質物質同様、斜長石

Table 1. Petrographic summary of representative phenocryst minerals in the Benri subunit and Oyatsu pumice flow deposit of Aso-4 pyroclastic flow deposits.

Unit	Rock type	Pl	Hbl	Cpx	Opx	Fe-Ti Ox	Ol	Phenocrysts total (vol. %)
7	Scoria (vol.%) zoning type	14~20	2~4	1~2	0.8~1.1	0.5~0.6	-	20~32
		nor, osc, dus	unz	unz	unz, rev	unz		
6	Scoria	12~22	2~4	1~1.5	0.4~0.6	0.6~0.8	~0.3	16~30
		nor, osc, dus	unz	rev, unz	rev, unz	unz	unz	
4	Scoria	7~20	2~4	0.8~1.5	0.5~0.8	0.6~0.8	~0.3	10~30
		nor, osc, dus	unz	rev, unz	rev	unz	unz	
3	Scoria	12~20	2~4	1~2	0.5~1.4	0.6~0.8	<0.3	17~28
		nor, osc, dus	unz	unz, rev	unz, rev	unz	unz	
2	Scoria	14~16	1~4	0.5~0.8	0.5~2	0.6~0.8	-	17~24
		nor, osc, dus	unz	unz	unz, rev	unz	unz	
7	Pumice	0.5~3.8	~0.4	~0.3	~0.3	<0.3	-	2~5
		nor, osc, (dus) unz	unz	unz	unz	unz	unz	
3	Pumice	1.5~7	0.5~1	0.4~0.6	0.4~0.6	0.3~0.5	-	3~10
		nor, osc, dus	unz	unz, rev	unz, rev	unz	unz	
2	Pumice	2~4	~0.5	~0.3	~0.3	<0.3	<0.3	3~5
		nor, osc, dus	unz	unz, rev	unz, rev	unz	unz	
1	Pumice	0.4~2	~0.3	~0.3	~0.3	<0.3	<0.3	2~3
		nor, osc, (dus) unz	unz	unz	unz	unz	unz	
4	BP-scoria	6~14	1~3	0.8~1.0	0.8~1.2	~0.3	<0.3	10~20
		nor, osc, dus	unz	rev, unz	rev, unz	unz	unz	
1	BP-scoria	6~14	1~3	0.6~1.2	0.8~1.5	0.4~0.6	-	10~20
		nor, osc, dus	unz	unz, rev	unz, rev	unz	unz	
4	BP-pumice	3~7	0.4~0.6	0.4~0.8	0.5~0.8	~0.3	-	5~10
		nor, osc, dus	unz	unz, rev	unz, rev	unz	unz	
1	BP-pumice	1.8~7	0.4~0.6	0.4~0.8	0.4~1.0	~0.4	-	3~10
		nor, osc, (dus) unz	unz	unz	unz, rev	unz	unz	
Oyatsu	Pumice*	0.6~2.2	~0.3	~0.3	0.3~0.5	0.3~0.5	-	2~4
		nor, osc	unz	unz	unz, (rev) unz	unz	unz	

*Oyatsu pumice samples are shown for comparison. Abbreviations: BP, banded pumice; Minerals: Pl, plagioclase; Hbl, hornblende; Cpx, clinopyroxene; Opx, orthopyroxene; Ol, olivine; Fe-Ti Ox, Fe-Ti oxides; Zoning: nor, normal zoning; osc, oscillatory zoning; dus, dusty zoned texture; unz, unzoned texture; rev, reverse zoning.

(0.2~1.8 mm), 角閃石 (0.2~2.0 mm), 斜方輝石 (0.3~0.7 mm), 単斜輝石 (0.2~0.4 mm) であり, カンラン石 (1.0 mm) をごく少量含んでいる。スコリア部と軽石部での斑晶の大きさに違いは認められない。斑晶量はスコリア部で 10~20 vol.%, 軽石部で 3~10 vol.% 程度であった。汚濁帯を持つ斜長石も同様に含んでいる。

いずれのユニットにも含まれる変質の少ない安山岩質角礫は, 斑晶鉱物として斜長石 (0.1~2.4 mm) を主に含み, 普通角閃石 (0.1~1.6 mm), 単斜輝石 (0.3~0.6 mm), 斜方輝石 (0.1~0.4 mm), 鉄チタン酸化物 (0.1~0.4 mm) を少量含む。石基として針状の斜長石 (0.02~0.05 mm) を多量に含む岩片も一部確認できた。

次に各ユニットにおける構成鉱物の特徴をまとめる (Table 1)。Unit 1 は, 軽石が多く, スコリアがごく少量含まれる。軽石の顕微鏡下での特徴は, カンラン石を微量に含む点が異なるが, 斑晶の量比や組み合わせ, および組織 (汚濁帯を示す斜長石が少ない) 等が Unit 7 の軽石の特徴に類似している。また, 基質が繊維状ガラス質である点も共通している。スコリアに関するこれらの両ユニットでの比較は, Unit 1 のスコリアが微細で一部変質を受けているため行っていない。Unit 1 の最下部に含まれる縞状軽石は, 鉱物組み合わせ等は Unit 4 の下部に見られるものと類似しているが, Unit 1 の軽石には, 斜長石の汚濁帯が少なく, Unit 4 のスコリアには微量のカ

ンラン石が含まれる点が異なっている。これらの縞状軽石の特徴は, それぞれが含まれるユニットの軽石, スコリアの特徴と類似する。また, Unit 2 と Unit 3 の軽石の特徴は, わずかな斑晶量の違いもあるが, 基質が繊維状ガラス質ではない点と斜長石斑晶に汚濁帯が顕著に認められる点が類似している。一方スコリアでは, 鉱物の組織等は類似しているが, 単斜輝石の量比が他のユニットのスコリアと比較し Unit 2 でやや低い点が異なっている。また, Unit 2 と Unit 3 では, カンラン石の有無 (Unit 2 の軽石, Unit 3 のスコリアに少量含まれる) に違いがある。Unit 3 は, 基質の色調, スコリアの大きさに違いはあるものの, Unit 4 と Unit 6 のスコリアと類似した鉱物組み合わせおよび量比を示している。これらの Unit 3, 4, 6 は, 斜長石の量比が各ユニット内のスコリアでも異なるが, 含有鉱物の組織やカンラン石を微量に含む点が共通している。Unit 4 と Unit 6 のスコリアは, 斑晶の量比におけるばらつきはあり, 斜方輝石の量比が他のユニットのスコリアに比べ低いが, それ以外は共通した特徴を示している。Unit 7 のスコリアの鉱物組み合わせと量比は Unit 3 などに近いが, カンラン石を含まない点が異なっている。Unit 7 の軽石は, 上述のように Unit 1 の軽石と類似している (Table 1)。

また弁り層以外の堆積物として, Aso-4 火砕流噴火の最初期の堆積物である小谷白色軽石流の軽石の顕微鏡観

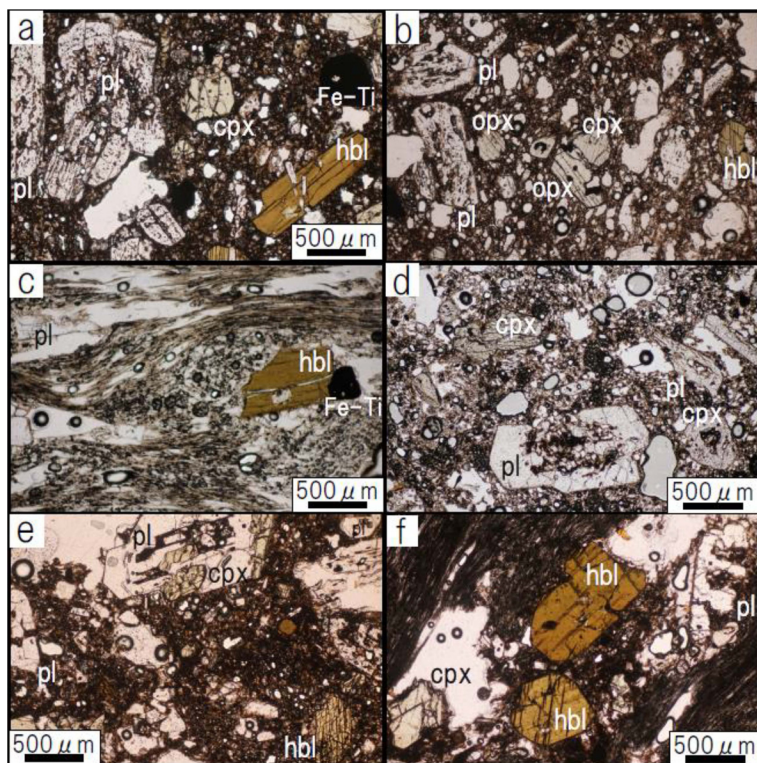


Fig. 6. Photomicrographs of juvenile fragments in the Benri subunit (Aso-4 pyroclastic flow). (a) Scoria from Unit 4. (b) Scoria from Unit 6. (c) Pumice from Unit 7. (d) Pumice from Unit 2. (e) Banded pumice (scoria part) from Unit 1. (f) Banded pumice (pumice part) from Unit 4. Abbreviations: pl, plagioclase; hbl, hornblende; cpx, clinopyroxene; opx, orthopyroxene; Fe-Ti, Fe-Ti oxide.

察も比較のために行った。小谷白色軽石は、弁利層の軽石と同様に斑晶として斜長石 (0.4~2.0 mm), 角閃石 (0.3~1.2 mm), 単斜輝石 (0.2~0.3 mm), 斜方輝石 (0.2~0.4 mm), 鉄チタン酸化物 (0.1~0.35 mm) を含む。斑晶量は 2~4 vol.% であり Unit 1 や 7 の軽石と似た特徴を示す (Table 1)。

4. 化学分析手法

鉱物化学組成および全岩化学組成分析に用いた試料は、Unit 1~7 に含まれる代表的なスコリア、軽石、縞状軽石である。また比較のために、小谷白色軽石流堆積物 (Watanabe, 1978) と阿蘇カルデラ東側の竹田地域に露出する阿蘇-4A 堆積物 (小野・他, 1977) 中の軽石も試料として一部使用した。

鉱物化学組成分析には、筑波大学研究基盤総合センター分析部門の波長分散型電子プローブマイクロアナライザー (JEOL 製 JXA-8530F) を使用した。加速電圧 15 kV, 照射電流 10 nA で分析を行った。これらの岩石試料の全

岩化学組成は、北九州市立自然史・歴史博物館の蛍光 X 線分析装置 (PANalytical 製 MagiX PRO) を使用して分析した。分析手順は、Mori and Mashima (2005) に従った。

弁利層の Unit 4 のスコリアと Unit 1 の軽石の 2 試料については、筑波大学の表面電離型質量分析計 (Finnigan MAT262) により Sr 同位体比を測定した。試料の調整および分析方法は、Arakawa *et al.* (1998) に従った。Sr 同位体比はいずれも $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr}=0.1194$ で規格化した。試料と同時に測定した標準試料 NIST 987 の Sr 同位体比は、 0.710250 ± 0.000016 (2σ ; $n=4$) であった。

5. 分析結果

5-1 鉱物化学組成の特徴

次に各ユニットに含まれる本質物質 (スコリア、軽石、縞状軽石) の斑晶鉱物の化学組成の特徴について述べる。斑晶鉱物 (斜長石, 単斜輝石, 斜方輝石, 角閃石, カンラン石, 鉄チタン酸化物) の代表的な化学組成を Table 2~4 に示す。Unit 1 を除く全てのユニット中のスコリアが含

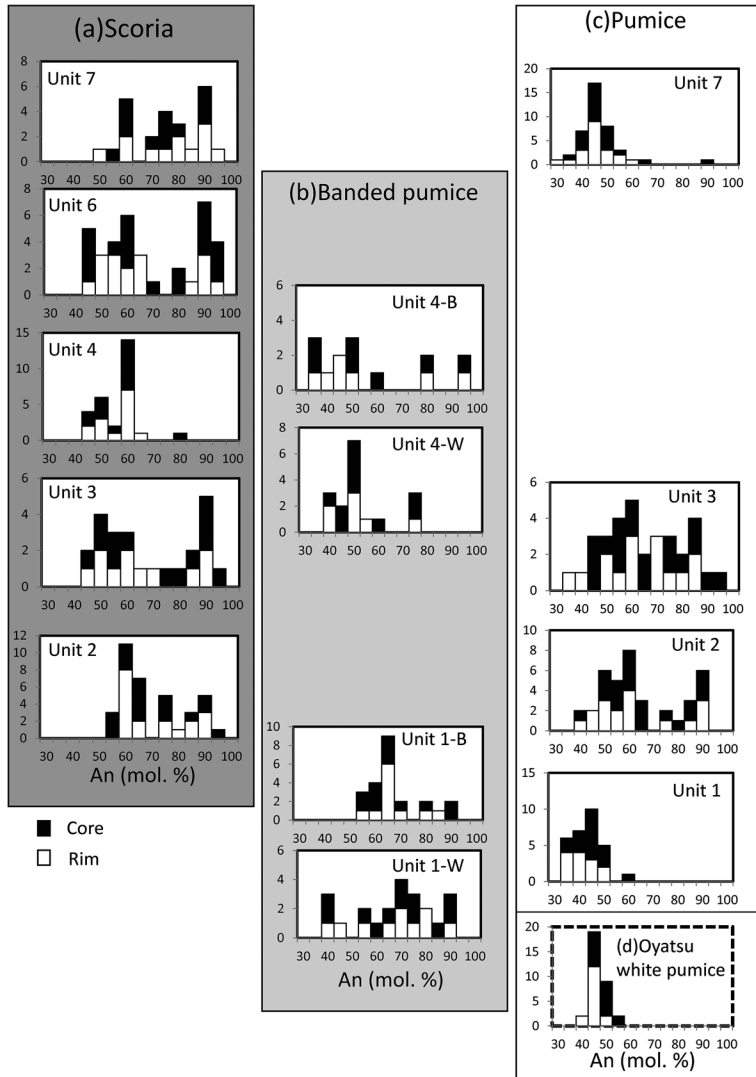


Fig. 7. Histograms of the anorthite content ($100 \times \text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na})$; mol.%) of plagioclase phenocrysts included in scoria, pumice, and banded pumice clasts in the Benri subunit (Aso-4 pyroclastic flow). (a) Plagioclase phenocrysts in Benri scoria. (b) Plagioclase phenocrysts in Benri banded pumice. B, scoria part in banded pumice; W, pumice part in banded pumice. (c) Plagioclase phenocrysts in Benri pumice. (d) Plagioclase phenocrysts in Oyatsu white pumice for comparison.

有する斜長石は、コアが $\text{An} (=100 \times \text{Ca}/(\text{Ca} + \text{Na}))_{40 \sim 92}$ 、リムが $\text{An}_{44 \sim 90}$ と広い組成幅を示す (Fig. 7)。いずれのユニットにも正累帯構造と逆累帯構造を持つ斜長石斑晶があり、コア An_{59} リム An_{79} のように大きな組成幅を持つ斑晶も少量存在する。各ユニットのスコリアに含まれる斜長石の An 値を以下に示す。Unit 2 はコアが $\text{An}_{50 \sim 90}$ 、リムが $\text{An}_{56 \sim 89}$ である。Unit 3 はコアが $\text{An}_{40 \sim 92}$ 、リムが $\text{An}_{44 \sim 90}$ である。Unit 4 はコアが $\text{An}_{42 \sim 59}$ 、リムが $\text{An}_{46 \sim 60}$ に集中し、 $\text{An}_{55 \sim 60}$ にピークを

持つ。Unit 6 はコアが $\text{An}_{41 \sim 92}$ 、リムが $\text{An}_{45 \sim 90}$ である。Unit 7 はコアが $\text{An}_{51 \sim 88}$ 、リムが $\text{An}_{45 \sim 90}$ である。Unit 4 を除き、いずれのユニットのスコリアも $\text{An}_{40 \sim 90}$ の広い組成幅を持つことが確認された。

縞状軽石内の斜長石は、黒～褐色部と白色部に分けて分析を行った (Fig. 7)。Unit 1 は、白色部でコア、リムともに $\text{An}_{39 \sim 89}$ と幅が広い組成を示し、黒～褐色部がわずかに狭い組成幅 ($\text{An}_{53 \sim 90}$) を示す (Fig. 7)。これらは、Unit 2 のスコリアの組成分布に近い。一方、Unit 4 は黒

Table 2. Representative chemical compositions of plagioclase phenocrysts in the Benri subunit and Oyatsu pumice flow deposit of Aso-4 pyroclastic flow deposits.

Unit	2	3	3	4	4	6	6	7	7	1	1	2	2
Rock	Scoria	Scoria	Scoria	Scoria	Scoria	Scoria	Scoria	Scoria	Scoria	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice
Sample No.	pl-15	pl-31	pl-31	pl-25	pl-25	pl-52	pl-52	pl-53	pl-53	pl-17	pl-17	pl-49	pl-49
Core/ Rim	Core	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
SiO ₂ (wt.%)	48.15	54.46	54.93	52.58	57.57	46.42	49.45	54.33	51.25	58.76	57.59	53.87	59.06
TiO ₂	0.00	0.06	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.05
Al ₂ O ₃	32.83	27.68	28.28	29.01	26.26	33.45	31.81	28.76	30.55	25.4	26.15	29.14	26.03
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.56	0.40	0.46	0.60	0.41	0.53	0.59	0.48	0.51	0.40	0.32	0.46	0.43
NiO	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.06
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
MgO	0.05	0.05	0.04	0.06	0.03	0.02	0.05	0.07	0.06	0.00	0.00	0.00	0.03
CaO	11.89	10.85	11.01	17.8	9.23	18.07	15.47	11.53	13.85	7.93	8.87	12.72	9.33
Na ₂ O	4.56	4.57	4.69	1.18	6.00	0.96	2.39	4.64	3.42	6.44	6.15	4.23	6.44
K ₂ O	0.24	0.17	0.17	0.04	0.41	0.02	0.05	0.22	0.13	0.37	0.31	0.22	0.37
Total	98.28	98.24	99.59	101.27	99.83	99.52	100.11	100.07	99.77	99.31	99.41	100.7	101.8
An	59.0	56.7	56.5	89.6	46.0	91.2	78.5	57.9	69.1	40.5	44.4	62.5	44.4
Ab	41.0	43.3	43.5	10.4	54.1	8.8	21.5	42.1	30.9	59.5	55.6	37.5	55.6

Abbreviations: BP, Banded pumice; An, Anorthite content(100×Ca/(Ca+Na)); Ab, Albite content(100×Na/(Ca+Na))

Table 2. (continued)

Unit	3	3	7	7	1	1	4	4	Oyatsu	Oyatsu
Rock	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	BP	BP	BP	BP	Pumice	Pumice
Sample No.	pl-20	pl-20	pl-8	pl-8	pl-40	pl-40	pl-35	pl-35	pl-45	pl-45
Core/ Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim	Core	Rim
SiO ₂ (wt.%)	54.88	55.39	57.84	57.78	50.30	50.25	56.75	56.59	57.28	58.90
TiO ₂	0.03	0.00	0.05	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	28.32	27.29	25.45	25.65	31.77	31.74	26.79	27.26	27.08	26.27
Cr ₂ O ₃	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02
FeO	0.49	0.54	0.32	0.37	0.44	0.64	0.42	0.42	0.34	0.35
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.03	0.04	0.02
MnO	0.03	0.00	0.00	0.06	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00	0.02
MgO	0.05	0.03	0.06	0.07	0.04	0.07	0.02	0.03	0.03	0.07
CaO	12.33	11.51	8.66	8.74	15.47	15.87	9.84	10.10	9.84	8.82
Na ₂ O	4.51	5.06	6.19	6.12	2.61	2.44	5.69	5.54	5.69	6.39
K ₂ O	0.19	0.25	0.40	0.40	0.05	0.09	0.35	0.29	0.33	0.43
Total	100.85	100.11	98.97	99.19	100.71	101.17	99.89	100.27	100.63	101.29
An	60.2	55.7	43.6	44.1	76.6	78.2	48.9	50.2	48.9	43.3
Ab	39.8	44.3	56.4	55.9	23.4	21.8	51.1	49.8	51.1	56.7

～褐色部と白色部でコアが An_{34~93}, リムが An_{30~91} の範囲に入り, 全体としては類似の組成分布を示すが, 白色部の組成が低い An 組成 (An_{40~55}) に集中が見られる。これらの組成分布は Unit 3, 6 のスコリアで見られた特徴と一致する。

軽石に含まれる斜長石もコアが An_{32~92}, リムが An_{29~90} と広い組成幅を示す (Fig. 7)。各ユニットの斜長石の組成は, スコリアや縞状軽石と同様に組成幅の広い Unit 2 (コア: An_{40~90}, リム: An_{40~90}) と Unit 3 (コア: An_{41~92}, リム: An_{35~85}), および低い An 値に集中する Unit 1 (コア: An_{32~58}, リム: An_{34~46}) と Unit 7 (コア: An_{34~86}, リム: An_{29~60}) の 2 種類に分けられる。比較のために分析した小谷白色軽石流の軽石内の斜長石は, コアが An_{41~53}, リムが An_{35~50} と低い An 値に集中し (Fig. 7), Unit 1 と 7 に化学組成の特徴が類似している。

このようにスコリアや軽石に見られる幅の広い斜長石の An 値は, Watanabe (1979) や Kaneko *et al.* (2007) でも報告されており, 全体的には類似する。しかし, 弁利サ

ブユニット内の各ユニットの軽石, スコリアの斜長石の An 値の特徴を明確にした点は, 本研究の新しい知見である。

単斜輝石, 斜方輝石については, 斜長石で区別したような各ユニットで分析, 比較を行ったが, 明瞭な差異が認められなかったため, スコリア, 軽石, 縞状軽石の黒～褐色部と白色部で区分し, 図に示した (Fig. 8)。単斜輝石は, スコリアおよび軽石において, コアとリム共に Mg# (100×Mg/(Mg+Fe²⁺))=78~81 であり, 弱い逆組成帯が見られることもある。その化学組成は Fe-Mg-Ca (mol. %) 三角図上で主にオーザイト領域にプロットされ, いずれも組成幅は狭いが, わずかにスコリアで Mg# が高い傾向が認められた (Fig. 8)。斜方輝石はコアが Mg#=74~77, リムが Mg#=75~78 であり, 組成幅は狭いが正累帯と逆累帯構造をわずかに確認できた。化学組成は, Fe-Mg-Ca (mol. %) 三角図上でクリノエンスタタイトの領域にプロットされ, いずれも組成幅は狭い (Fig. 8)。

Table 3. Representative chemical compositions of clinopyroxene and orthopyroxene phenocrysts in the Benri subunit and Oyatsu pumice flow deposit of Aso-4 pyroclastic flow deposits.

Unit	3		2		1		Oyatsu	
Rock	Scoria	Pumice	BP	Pumice	Scoria	Pumice	BP	Pumice
Sample No.	cpx-31	cpx-41	cpx-40	cpx-43	opx-52	opx-30	opx-18	opx-45
SiO ₂ (wt.%)	52.38	52.31	52.67	52.48	56.11	56.63	55.58	55.74
TiO ₂	0.67	0.73	0.42	0.67	0.22	0.17	0.22	0.14
Al ₂ O ₃	3.06	3.38	2.30	3.20	0.58	0.69	0.68	0.51
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.04
FeO	8.05	7.84	6.90	7.48	15.76	15.62	16.47	15.98
NiO	0.04	0.03	0.05	0.07	0.00	0.00	0.00	0.03
MnO	0.48	0.36	0.36	0.23	1.56	1.40	2.26	1.62
MgO	15.73	14.95	16.09	15.24	25.67	25.58	25.18	26.30
CaO	19.75	20.91	21.18	21.64	1.09	1.27	1.06	1.00
Na ₂ O	0.38	0.40	0.42	0.31	0.01	0.02	0.00	0.03
K ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02
Total	100.54	100.92	100.40	101.32	101.02	101.43	101.45	101.41
Wo	41.21	43.72	43.26	44.45	2.23	2.59	2.17	1.99
En	45.68	43.49	45.74	43.55	72.73	72.56	71.57	73.10
Fs	13.11	12.80	11.00	12.00	25.04	24.84	26.25	24.91
Mg#	77.70	77.26	80.61	78.40	74.39	74.49	73.16	74.59

Abbreviations: cpx, clinopyroxene; opx, orthopyroxene; BP, Banded pumice; Wo, Wollastonite(100×Ca/(Ca+Mg+Fe²⁺)); En, Enstatite(100×Mg/(Ca+Mg+Fe²⁺)); Fs, Ferrosilite(100×Fe²⁺/(Ca+Mg+Fe²⁺)); Mg#, Mg number(100×Mg/(Mg+Fe²⁺)).

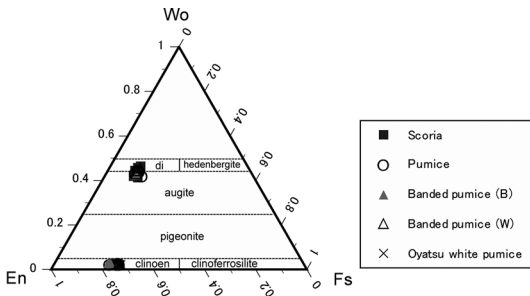


Fig. 8. Chemical compositions of clinopyroxene and orthopyroxene phenocrysts in the Benri subunit and Oyatsu pumice flow deposit (Aso-4 pyroclastic flow). Figure is from Deer *et al.* (1997). B, scoria part in banded pumice; W, pumice part in banded pumice; di, diopside; clinoen, clinoenstatite.

角閃石の Mg# は 70~73 に集中し、弁利層中のスコリアおよび軽石で、いずれも大きな組成幅および違いは認められなかった (Fig. 9)。スコリアに含まれる角閃石は、軽石に含まれているものよりも Al^{IV} をわずかに多く含む特徴が見られた。縞状軽石の黒~褐色部と白色部についても区別してプロットしたが、前者がスコリアに、また後者が軽石組成に近いことがわかる。多くの角閃石がパーガス角閃石系列にあたるが、いずれも広義の普通角閃石の組成領域にプロットされる (Fig. 9)。

カンラン石の化学組成は Fo₇₄₋₇₆ であり、いずれも組成は均質に近い (Table. 4)。このように両輝石、角閃石、カンラン石は、Mg# や化学組成のばらつきは顕著には見られず、岩石種やユニットによる化学組成の明瞭な違いは確認されなかった。

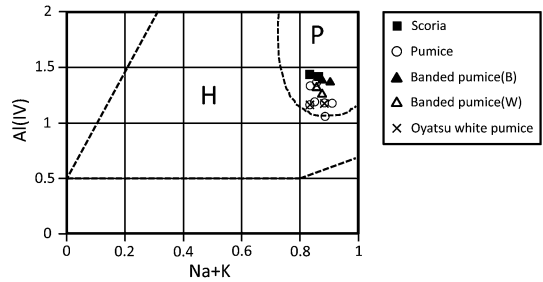


Fig. 9. Chemical compositions of hornblende phenocrysts in the Benri subunit and Oyatsu pumice flow deposit (Aso-4 pyroclastic flow). Figure is from Deer *et al.* (1997). B, scoria part in banded pumice; W, pumice part in banded pumice. H, hornblende; P, pargasite.

5-2 全岩化学組成

全岩化学組成分析によって得られたスコリア、軽石、縞状軽石の代表的な主要・微量元素組成の結果を Table 5、および Figs. 10, 11 に示す。SiO₂ 含有量はスコリアが 52~57 wt.% で玄武岩質安山岩組成、軽石が 65~68 wt.% でデイサイト組成である。縞状軽石は黒色部が 56~57 wt.% で玄武岩質安山岩~安山岩組成、白色部が 59~64 wt.% で安山岩~デイサイト組成であり、スコリアと軽石の中間的な組成を示した。分析したスコリア、軽石の主要元素組成は、Fig. 10 に見られるように、SiO₂ に対して多くの元素で直線的なデータ列を示す。また、微量元素組成も弁利層のスコリア、軽石、縞状軽石では、Rb, Zr, Sr, Ba, Y, V についても、ばらつきの少ない直線的な関係が認められた (Fig. 11)。Al₂O₃, Na₂O, Nb については、他の元素と比較してわずかなデータの分散は見られるが、全体的には直線的なデータ分布と読み取ることが

Table 4. Representative chemical compositions of hornblende, olivine and Fe-Ti oxide phenocrysts in the Benri subunit and Oyatsu pumice flow deposit of Aso-4 pyroclastic flow deposits.

Unit	4				3				1				Oyatsu			
Rock	Scoria		Pumice		BP		Pumice		Scoria		Pumice		BP		Pumice	
Sample No.	hbl-33	hbl-14	hbl-40	hbl-43	ol-31	ol-19	ol-41	Fe-Ti-34	Fe-Ti-14	Fe-Ti-42	Fe-Ti-43	ol-31	ol-19	ol-41	Fe-Ti-34	Fe-Ti-43
SiO ₂ (wt.%)	43.87	45.38	45.49	45.79	39.02	40.07	39.22	0.10	0.15	0.11	0.00	39.02	40.07	39.22	0.10	0.15
TiO ₂	3.03	3.08	3.04	3.34	0.00	0.05	0.00	8.77	9.31	9.18	9.24	0.00	0.05	0.00	8.77	9.31
Al ₂ O ₃	11.88	9.61	10.05	9.50	0.00	0.01	0.02	4.56	3.82	2.46	2.56	0.00	0.01	0.02	4.56	3.82
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.06	0.04	0.00	0.05	0.03	0.00	0.00	0.06	0.04
FeO	10.97	11.32	10.55	11.35	22.39	22.80	21.96	77.05	75.60	79.22	79.30	22.39	22.80	21.96	77.05	75.60
NiO	0.00	0.00	0.07	0.03	0.08	0.03	0.04	0.11	0.00	0.00	0.00	0.08	0.03	0.04	0.11	0.00
MnO	0.21	0.50	0.35	0.64	0.83	0.54	0.45	0.63	1.11	0.98	1.24	0.83	0.54	0.45	0.63	1.11
MgO	14.82	15.19	16.14	15.19	39.10	38.68	39.57	3.95	3.86	2.53	2.63	39.10	38.68	39.57	3.95	3.86
CaO	11.32	11.32	11.52	10.98	0.10	0.12	0.10	0.00	0.09	0.00	0.00	0.10	0.12	0.10	0.00	0.09
Na ₂ O	2.59	2.36	2.65	2.57	0.00	0.06	0.03	0.03	0.00	0.06	0.09	0.00	0.06	0.03	0.03	0.00
K ₂ O	0.54	0.78	0.62	0.76	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
Total	99.22	99.54	100.49	100.14	101.54	102.36	101.40	95.26	93.98	94.54	95.11	101.54	102.36	101.40	95.26	93.98

Abbreviations: hbl, hornblende; ol, olivine; Fe-Ti, Fe-Ti oxide; BP, Banded pumice

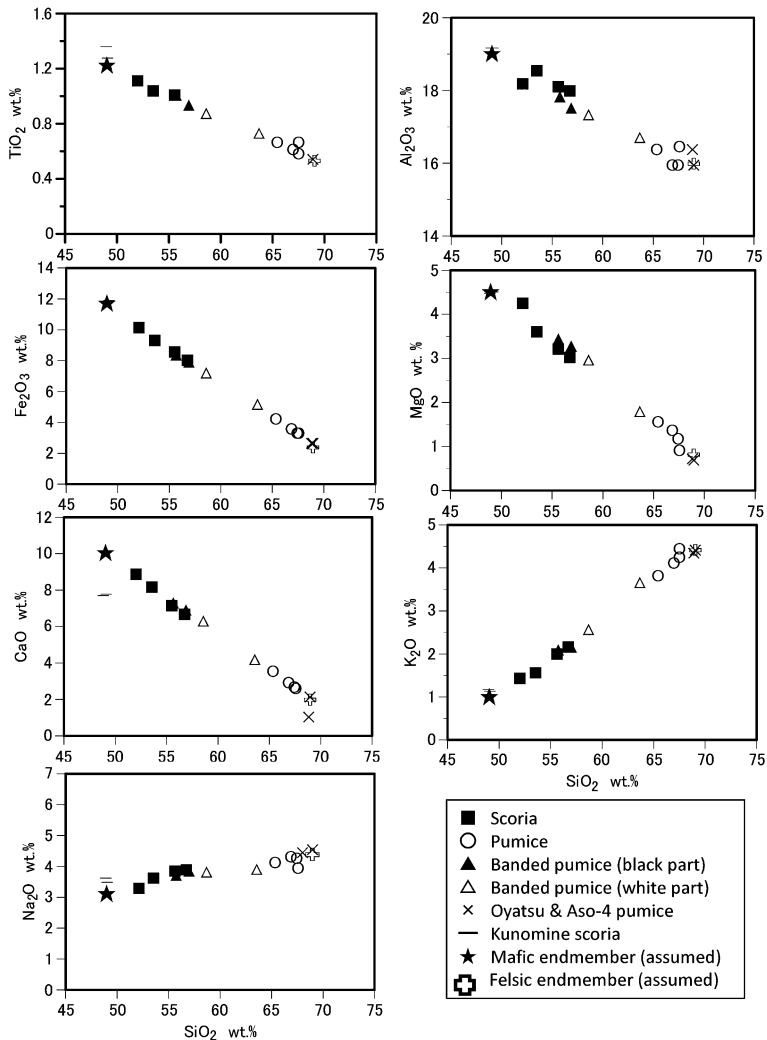


Fig. 10. Major elements (TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO, Na₂O and K₂O) vs. SiO₂ diagrams of scoria, pumice and banded pumice from the Benri subunit (Aso-4 pyroclastic flow). Data of Oyatsu and Aso-4 A pumice flow deposits (this study), and Kunomine scoria flow deposits (Kaneko *et al.*, 2007) are plotted for comparison. The black star and open cross symbols indicate assumed mafic and felsic end-members, respectively.

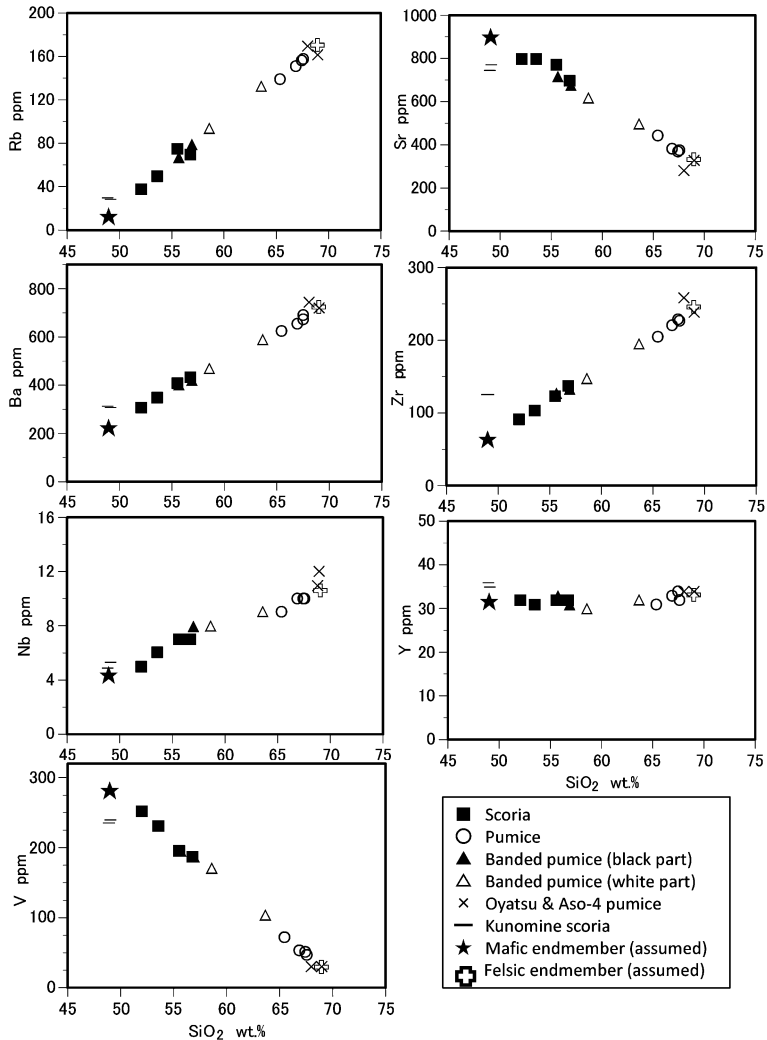


Fig. 11. Trace elements (Rb, Sr, Ba, Zr, Nb, Y and V) vs. SiO₂ diagrams of scoria, pumice and banded pumice of the Benri subunit (Aso-4 pyroclastic flow). Data of Oyatsu, Aso-4A pumice flow deposits (this study), and Kunomine scoria flow deposits (Kaneko *et al.*, 2007) are plotted for comparison. The black star and open cross symbols indicate assumed mafic and felsic endmembers, respectively.

できる (Figs. 10, 11). また, 比較のために測定した Aso-4 火砕流最初期の噴出物である小谷白色軽石と阿蘇-4A 火砕流の軽石の SiO₂ 含有量は 69 wt.% であり, Aso-4 の第 2 噴火サイクルで噴出した九ノ峰スコリア (4II-3) (Watanabe, 1979; Kaneko *et al.*, 2007) は 49~52 wt.% である (Figs. 10, 11 では久ノ峰スコリアの最も苦鉄質組成の値を引用). 弁利サブユニットの軽石と比較すると, 小谷白色軽石の SiO₂ 含有量はわずかに高いが, 主要元素, 微量元素ともに弁利サブユニットの噴出物と多くの元素で直線的な関係が認められる. 一方, 九ノ峰スコリアは弁

利サブユニットの主要元素組成では, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, K₂O は弁利サブユニットとの噴出物で示される直線の延長部に相当するが, 他の元素 (CaO, Na₂O) については直線の関係から外れた組成を示した. また, 微量元素組成でも同様に直線的な分布を示すこと, および九ノ峰スコリアがその直線の延長部から外れた分布を示すことが確認された (Fig. 11).

また, N-MORB 組成 (Sun and McDonough, 1989) で規格化した微量元素パターン (Fig. 12) は, 基本的には LIL 元素 (Rb~K) に富み, HFS 元素 (Nb~Y) に乏しいパ

Table 5. Whole-rock chemical compositions of scoria, pumice and banded pumice in the Benri subunit, and Oyatsu and Aso-4 A pumice deposits.

Unit	1	2	3	7	3	4	6	7	1	4	1	4	Oyatsu	Aso-4A
Rock type	Pumice	Pumice	Pumice	Pumice	Scoria	Scoria	Scoria	Scoria	BP-Black	BP-Black	BP-White	BP-White	Pumice	Pumice
SiO ₂ (wt.%)	66.90	67.47	65.41	67.55	52.04	55.55	53.51	56.72	56.93	55.68	58.59	63.60	68.97	68.84
TiO ₂	0.61	0.66	0.66	0.58	1.11	1.01	1.04	0.97	0.93	1.01	0.87	0.73	0.53	0.54
Al ₂ O ₃	15.93	15.96	16.39	16.44	18.20	18.09	18.54	17.99	17.53	17.81	17.31	16.70	15.93	16.38
Fe ₂ O ₃	3.54	3.31	4.19	3.25	10.12	8.54	9.31	7.98	7.89	8.37	7.13	5.11	2.61	2.65
MnO	0.13	0.12	0.13	0.11	0.19	0.18	0.18	0.17	0.17	0.17	0.16	0.14	0.12	0.11
MgO	1.36	1.16	1.55	0.90	4.25	3.20	3.60	3.03	3.26	3.42	2.94	1.77	0.68	0.72
CaO	2.90	2.66	3.52	2.59	8.85	7.16	8.16	6.64	6.88	7.28	6.28	4.14	2.09	1.93
Na ₂ O	4.31	4.24	4.13	3.95	3.28	3.83	3.63	3.90	3.86	3.71	3.82	3.89	4.52	4.36
K ₂ O	4.12	4.25	3.81	4.46	1.43	1.98	1.56	2.16	2.14	2.08	2.54	3.65	4.42	4.36
P ₂ O ₅	0.17	0.17	0.21	0.17	0.53	0.46	0.47	0.44	0.40	0.46	0.36	0.27	0.13	0.11
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
Rb (ppm)	151	156	139	158	37	75	50	69	79	66.78	93	132	162	169
Sr	380	370	440	376	794	767	799	699	676	715	616	493	331	282
Zr	220	228	204	227	92	122	103	136	132	126	147	194	239	258
Ba	656	674	626	692	308	407	350	430	421	405	468	588	719	744
Nb	10	10	9	10	5	7	6	7	8	6	8	9	12	11
Y	33	34	31	32	32	32	29	34	31	33	30	32	34	34
V	53	51	72	47	251	196	230	186	187	195	170	103	30	31

Analyzed major element data were normalized to 100 wt. % as total. Abbreviation: BP, Banded pumice

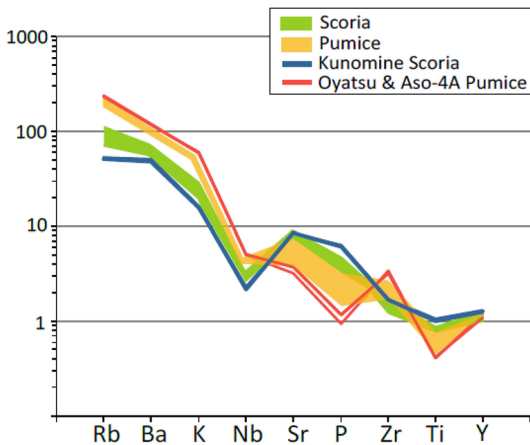


Fig. 12. Trace elements variation patterns of the Benri subunit (Aso-4 pyroclastic flow). Data of the Oyatsu and Aso-4 A pumice flow deposits (this study), and Kunomine scoria flow deposits (Kaneko *et al.*, 2007) are shown for comparison. All data are normalized to the N-MORB values of Sun and McDonough (1989).

ターンを示し、これらは島弧火山の特徴と一致する。この元素パターンを比較すると、軽石とスコリアには明確に差異があることがわかる。また、軽石はスコリアと比較して Rb, Ba, K, Nb, Zr に富んでいる。スコリアは Rb, Ba において組成幅が大きく、苦鉄質マグマの組成の不均一性が見られる。また、主要・微量元素組成と同様に、小谷白色軽石と阿蘇-4A 火砕流の軽石、九ノ峰スコリアの微量元素組成を比較のために示したが、両者のパターンは、Zr を除き弁利層のデータ分布を挟む形態を示す。

5-3 Sr 同位体比

弁利サブユニットの代表的な Unit 4 のスコリアと Unit 1 の軽石の 2 試料について、Sr 同位体比を分析した。スコリアの $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ は 0.704067 ± 0.000008 ($2\sigma_m$)、軽石は 0.704075 ± 0.000010 ($2\sigma_m$) であった。これらの値は、化学処理等を加えた分析ルーティーンにおける分析誤差 (± 0.000025) の範囲内に入る。これらの値は、Hunter (1998) が報告した Aso-4 火砕流の値 (0.70402~0.70409) や新村・荒川 (2007) が報告したカルデラ形成期の火砕流堆積物の値 (0.7040~0.7041) のデータ範囲内に入り、それらと比較して大きな差異はなかった。

6. 議 論

6-1 弁利サブユニットのスコリア・軽石混在層の層序の特徴

本論の弁利サブユニットは、スコリア、軽石、安山岩質岩片の量比や大きさなどがユニットごとに異なるものの、全体的にそれらが共通して含まれ、限られた層序に縞状軽石が存在するという特徴を持っている。本研究では、それらに加え、基質の特徴なども考慮し、7つのユニットに区分した。今回の調査・観察結果からは、Unit 1 から Unit 7 にかけて、本質物質として、軽石主体からスコリア主体となり、その後再度軽石の増加が生じたこと、また各ユニットの噴出物の特徴が変化していったことも明らかになった (Fig. 4)。これらの各ユニットの特徴は、マグマ溜りからの珪長質および苦鉄質マグマの供給量比の違いや、それらの火砕流発生・流送時における混合、摩耗の違いなど、さらには噴火時の火道等を構成していた火山岩 (安山岩質角礫) の混合などの違いも示している。

Unit 1 と Unit 4 の下部における縞状軽石の存在は、弁利サブユニットの特徴の一つである。縞状軽石は、一般的には苦鉄質マグマと珪長質マグマとの火道域での混合により形成された噴出物である。その成因は、珪長質マグマと苦鉄質マグマが同時に上昇し、火道や地下浅部で不均質に混合（機械的混合）することで形成されたと考えられており（例えば、岩永, 1968; 小屋口, 1986; 安井, 1994）、弁利層の縞状軽石も同様な過程を経て形成されたと推定される。

また安山岩質角礫は、Unit 1~7 までのすべてのユニットに含まれるが、その主要鉱物組み合わせで、斜長石、単斜輝石、斜方輝石に加え、普通角閃石を含有するという特徴が見出された。角閃石の含有は、Aso-4 火砕流堆積物の全体的な特徴である（例えば、Kaneko *et al.*, 2007; 三好・他, 2009）。一方、先阿蘇火山岩類（先カルデラ火山岩類）（三好・他, 2009）や、カルデラ形成期以降の溶岩（本塚溶岩; 小野・渡辺, 1985）や降下軽石層（宮縁・他, 2003）などには稀に、角閃石が確認されている。また、Unit 5 の石質岩片濃集層（安山岩質角礫）は、上下の層の関係からは火砕流の基底礫（ground layer）ではなく、マグマの上昇時の一時的な火道の拡大、あるいは火砕流の中での部分的な濃集によるものと推測される。上野 (2007) は、始良カルデラ形成時に噴出した入戸火砕流堆積物中の石質岩片濃集層を詳しく記載した。その論文では、レンズ状~層状の石質岩片の濃集層が火砕流堆積物の基底部だけでなく、上位あるいは堆積物中央部にも多く確認され、それらは火道の拡大によって生じた火砕流に含まれる石質岩片の濃度や流れの速度の時間変化と累積型の堆積（Branney and Kokelaar, 1992）で説明できると結論づけている。本論の Unit 5 の石質岩片層も類似の過程での形成が推定される。

6-2 弁利サブユニットのスコリア、軽石、縞状軽石の起源マグマの推定

まず、弁利サブユニットに見られる本質物質（スコリア、軽石、縞状軽石）の顕微鏡観察結果、岩石学的、化学的データを基に、それらのマグマの特徴と形成プロセスの推定を試みる。

一般に、火砕流に含まれる異なった組成を持つ本質物質を形成したマグマの形成過程として、地下に存在する珪長質、苦鉄質のそれぞれ異なったマグマからの機械的な混合、あるいは層状マグマ溜り（マグマ混合等を経験した組成勾配をもつ）からの噴出過程に伴った混合がある。マグマ混合とは、地下において異なった組成のマグマが混合するプロセスのことで、成層マグマ溜まりを作ってその境界域で混合する場合や、異なった場所にある組成の異なるマグマが混合する場合などがある（例え

ば、Eichelberger, 1975; 小屋口, 1986; Bloomfield and Arculus, 1989; Ishizaki, 2007）。

弁利サブユニットのスコリアについては、顕微鏡観察の結果から、斑晶、石基鉱物組み合わせがいずれのユニットのものもほぼ類似するが、多くのユニットから汚濁帯や逆累帯構造を持つ斜長石斑晶や融食された斑晶鉱物が確認され、それらの結果はマグマ混合の影響を強く受けていたことを示唆している。斜長石斑晶の An 値の分析結果は、いずれも An_{40~92} の広い組成幅を示し、パイモダルの分布を示す場合が多い（Fig. 7）。全岩化学組成分析の結果、スコリアの組成は玄武岩質安山岩組成~安山岩組成（52~57 wt.%）であり、軽石と比較して組成幅が広い（Figs. 10, 11）。これらの弁利サブユニットのスコリアの化学組成は、後述の軽石の組成とハーカー図において直線的な相関関係が認められる。化学組成図におけるこれらの直線的なデータ配列も二つの端成分組成を持つマグマの混合の可能性を強く示している。また、弁利サブユニット以後に噴出した Aso-4 火砕流最後の苦鉄質噴出物である九ノ峰スコリアは、玄武岩質組成（49~52 wt.%）であり、斜長石の An 値の組成幅も広い（Kaneko *et al.*, 2007）結果が得られている。九ノ峰スコリアの中の最も苦鉄質な岩石は、主要元素組成と微量元素組成については、弁利サブユニットの噴出物と直線的な関係を示さないものが多い。このことから、九ノ峰スコリアのマグマは弁利サブユニットのマグマとは実質的には異なり、弁利サブユニットの苦鉄質端成分マグマは異なった化学組成を持っていた可能性が高い（Figs. 10, 11）。弁利サブユニットのスコリアの端成分マグマは主要・微量元素組成の直線関係の延長上に位置する化学組成を持つと推測される（Figs. 10, 11 のハーカー図に黒星印で示した）。

一方、軽石の全岩化学組成分析の結果は、いずれもデイサイト組成を示す（Table 5）。この組成は、Aso-4 火砕流最初期の噴出物である小谷白色軽石や阿蘇-4A 軽石に近いが、それらよりもわずかに SiO₂ 含有量が低い。顕微鏡観察と斜長石の An 値の分析結果より、弁利サブユニットの軽石は Unit 1 と 7、Unit 2 と 3 の 2 種類に分けられる。An_{30~50} の低い An 値に集中し（Fig. 7）、斑晶量の少ない Unit 1 と 7 の軽石は、最も珪長質な小谷白色軽石に類似している。しかし、主要元素組成や微量元素パターンを比較すると、小谷白色軽石とは起源マグマの化学組成がわずかに異なる（Figs. 10~12）。Unit 2 と 3 の軽石は、スコリアや縞状軽石と同様に An 値の広い組成幅（Fig. 7）や汚濁帯や逆累帯構造を持つ斑晶が存在することから、マグマ混合の影響が推測される。しかし、主要・微量元素組成や微量元素のスパイダー図

(Figs. 10~12) からは、Unit 1 や 7 の軽石の組成と大きな差異は見られない。このことから、Unit 2 と 3 の軽石の元となるマグマが受けた混合作用は、マグマの化学組成が大きく変化するような混合作用ではなかった（あるいはその作用が全岩試料としては確認できない程度の混合）と考えられる。また、このマグマ混合は地下のマグマ溜りで既に生じており、弁利サブユニット噴出時にその混合したマグマが噴出した可能性が高い。本論で示した化学組成データの直線の延長に小谷白色軽石と阿蘇-4A 軽石が存在することが多いが、一部の元素で直線からわずかに外れた値を示す（例えば、 Al_2O_3 、 CaO 、 Nb ；Figs. 10, 11）。その直線分布を考慮し、珪長質端成分マグマの推定も行った（Figs. 10, 11 の白色クロス印）。

縞状軽石は、全岩化学組成の結果から、安山岩およびデイサイト組成であり、軽石とスコリアの中間的な組成を示す。このことは、縞状軽石を形成したマグマは、スコリアや軽石を形成したマグマとは化学組成がわずかに異なることを示す。縞状軽石のスコリア部および軽石部を形成したマグマは、苦鉄質—珪長質（成層）マグマの境界域にすでに存在していた可能性がある。

全岩化学組成の結果からは、弁利サブユニットの噴出物において 59~63 wt.% の組成（安山岩組成）を持つものは見られない。このことは、珪長質マグマと苦鉄質マグマの境界部において組成差が生じていたものであると考えられる。Aso-4 を含めたカルデラ形成期の噴火噴出物において、安山岩組成の噴出物が稀であることは、マグマ溜りにおける組成のギャップが苦鉄質—珪長質マグマの間に存在していた可能性を示唆している。ただし、縞状軽石の白色部の 1 試料は SiO_2 が 59% で、苦鉄質マグマに近い組成を示していた。これは機械的な混合をする場合に生じた不均一性による可能性があり、苦鉄質マグマ起源の可能性もある。

また、Figs. 10, 11 で示されたスコリア、軽石、縞状軽石のそれぞれの連続的な組成分布、および全体的にスコリアと軽石の間に挟在する元素分布パターン（Fig. 12, 元素スパイダー図）は、上記の二つの端成分マグマの混合で説明がつく。

弁利サブユニットの噴火・噴出が、別々に存在する異なったマグマの機械的混合によるマグマの噴火や、不均一に混合したマグマ溜りに起因するマグマの噴火により形成された可能性は完全に否定はできない。しかしながら、前項で述べてきた弁利サブユニットの特徴を考慮すると、連続的（あるいは一部断続的）な一連の噴火によって形成された可能性が強いと考えられる。これらを基に、本論では弁利サブユニットの噴出時のマグマは地下のマグマ供給系においてすでに珪長質および苦鉄質マ

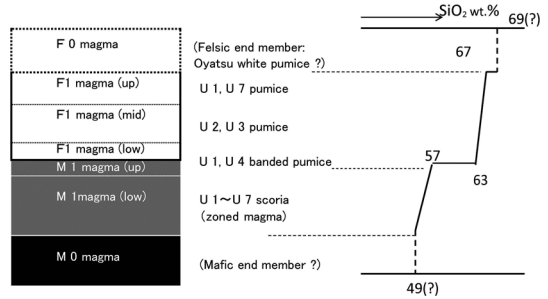


Fig. 13. An assumed magma chamber model for the Benri subunit (Aso-4 pyroclastic flow), and the corresponding vertical profile of whole rock composition (SiO_2 wt.%) of the Benri subunit (not to the scale). M0, M1 magma, mafic magma; F0, F1 magma, felsic magma; up, upper part; mid, middle part; low, lower part. The SiO_2 contents in the profile are rough estimate.

グマの混合を受け、上下方向に化学組成が異なる（組成勾配を持つ）マグマ溜りから噴出したものと推定した（Fig. 13）。弁利サブユニットの起源となったマグマは、1) スコリアを形成したマグマ（縞状軽石の黒色部を形成したマグマを上部に含む上下方向に化学組成の違いのあるマグマ；M1 マグマ）、2) 縞状軽石の白色部、Unit 2 と 3 の軽石を形成したマグマ、および Unit 1 と 7 の軽石を形成したマグマ（F1 マグマ）、に区分できる。このマグマ溜りでは、1)、2) の間に組成のギャップが生じていたものと考えられる。また、2) のマグマは 1) のマグマ同様上下方向に化学組成の違いを持っていたものと推測される。また、最も珪長質な小谷白色軽石（あるいは阿蘇-4A 軽石）の起源マグマを珪長質端成分マグマとして仮定した場合、それらのマグマはマグマ溜り最上部に存在していたものと考えられる（F0 マグマ）。また苦鉄質端成分マグマ（M0 マグマ）は上記 1) のマグマの下に位置していたと考えられるが、弁利サブユニット噴出時は、そのマグマは噴出していない。

苦鉄質マグマは、上部マントルで発生したマグマ、あるいはその分化マグマと考えられる。一方、珪長質マグマは、玄武岩質—安山岩質マグマからの分化したマグマ、あるいは地殻物質の部分熔融により生じた可能性がある。本研究で得られた、珪長質マグマと苦鉄質マグマの Sr 同位体比の一致は、両者の起源物質の同位体的な類似性を示している。

6-3 マグマ溜りとその噴出過程の推定

Aso-4 火砕流のマグマ溜りの層構造は、小野・渡辺 (1983) や Kaneko *et al.* (2007) ですでに推定されている。Kaneko *et al.* (2007) では、下位より苦鉄質マグマ（組成

勾配を持つ)、珪長質な混合マグマ(均一組成)、珪長質端成分マグマの3つのマグマが存在する層構造を推定している。本論でのマグマ溜りの推定は上記先行研究と類似する。前項で述べてきた弁利サブユニット層序、鉱物の化学組成、全岩の化学組成等を考慮し、弁利サブユニット形成時のマグマ溜り(組成的に層構造を示す)を推定した(Fig. 13)。噴出時に地下において、苦鉄質端成分のM0マグマ、弁利サブユニットのスコリアを形成したマグマ(組成勾配を持つ)M1(low, up)マグマ、縞状軽石の白色部を形成したF1(low)マグマ、およびUnit 2と3のF1(mid)マグマ、Unit 1と7の軽石の起源となるF1(up)マグマ、珪長質端成分F0マグマの7つのマグマが組成層構造を成してマグマ溜りを形成していたと考えられる。

弁利サブユニットの噴出は、まず少量のスコリアの起源マグマを伴いながらUnit 1と7の軽石の起源マグマ(F1(up))が噴出し、その後Unit 2と3のマグマ(F1(mid))が主体となり噴出した。このように噴出物の前半には、デイサイト組成のマグマが中心とした噴出が主体であった。その後、Unit 4, 6で、スコリアを形成したマグマが主体となり噴出し(M1(low))、それらは玄武岩質安山岩組成のマグマを中心とした噴出であった。Unit 1と4の下部に存在する縞状軽石はマグマ溜まり境界部に存在するM1(up)、F1(low)両マグマが一時的に火道内で(機械的に)混合をした結果であると考えられる。また、噴出末期(Unit 7)にはスコリアのM1(low)マグマにF1(up)マグマが再び噴出に加わったと考えられる。この噴火の推移は、上層に存在した珪長質マグマの火道への流入時のマグマの流れに伴う引きずりにより、下部の苦鉄質マグマの上方への持ち上げ(上昇)(例えば、Blake and Campbell, 1986)が、徐々に増加し、その後減衰するというマグマ活動の一連の変化に対応していると考えられる。また苦鉄質、珪長質両マグマの機械的な混合によって形成された縞状軽石は、噴出ユニットの最初に噴出する場合が多い可能性が示唆されたが、これは一連の(あるいは断続的な)噴火活動の中での一時的な噴火噴出の強弱を反映していると推定される。

7. ま と め

本研究では阿蘇カルデラ形成期後期、Aso-4火砕流噴出物の中のスコリアと軽石を本質物質として含む弁利スコリア流堆積物(弁利サブユニット)に焦点を当て、噴出物の層序の詳細な記載とユニット区分、本質物質の斑晶鉱物や石基の顕微鏡観察、鉱物化学組成分析、および全岩の化学組成分析、Sr同位体比の測定を行った。その結果、スコリアと軽石および石質岩片の量比、形状、岩

石基質の特徴などを基に、層序的にUnit 1~7の7つの層に区分した。Unit 1~3は非溶結の軽石優勢層(上部に向かってスコリアの量比が増加)、Unit 4, Unit 6は弱溶結のスコリア優勢層(Unit 5は狭在する石質岩片濃集層)、Unit 7はスコリア—軽石混合層で、再度軽石の量比も増加する。スコリア、軽石およびUnit 1, Unit 4の最下部に含まれる縞状軽石に含まれる斑晶鉱物は、量比は異なるものの斜長石、単斜輝石、斜方輝石、角閃石、鉄チタン酸化物、およびカンラン石が含まれる点は共通している。顕微鏡観察結果や特に斜長石のAn組成の特徴から、各ユニットにおけるスコリア、軽石等は多くの場合、マグマ混合により形成されたことが示唆された。また全岩化学組成の特徴からも、スコリア、軽石、縞状軽石が直線的にプロットされ、珪長質、苦鉄質の2つの端成分をもつマグマの混合によることが示された。これらの結果を考慮すると、スコリア、軽石等の起源マグマは、それぞれ垂直方向に組成勾配をもつ層状マグマ溜まり(苦鉄質-珪長質)から継続的(あるいは一部断続的)に噴出したこと、およびそれらの層状マグマはすでに混合したマグマであったことが推測された。さらに、この混合マグマの噴出は、全体的には珪長質マグマ主体から苦鉄質マグマ主体へ、さらに珪長質マグマが再度噴出するという過程を示し、常に両マグマを伴う噴火であることが推測できた。

謝 辞

本研究を行う過程で、筑波大学生命環境科学研究科・地球進化科学専攻の角敏昭教授、および産業技術総合研究所の高田 亮氏には有益なご意見をいただきました。また、稿の初期段階において、福井大学の三好雅也氏には多数の有益なコメントをいただきました。また、本論文の査読者である宮縁夫氏、金子克哉氏、および編集委員の横尾亮彦氏には、丁寧でかつ建設的なコメントを多数頂き、本論文の改善に役立てることができました。さらに、当時岩石学研究室の田島義之氏(現: 埼玉県庁)、金井啓通氏(現: 国際航業(株))には各種作業、および議論等でお世話になりました。これらの方々に著者一同、心より感謝いたします。

引用文献

- Arakawa, Y., Kurosawa, M., Takahashi, K., Kobayashi, Y., Tsukui, M. and Amakawa, H. (1998) Sr-Nd isotopic and chemical characteristics of the silicic magma reservoir of the Aira pyroclastic eruption, southern Kyushu, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **80**, 179-194.
- Best, M. G. and Christiansen, E. H. (2001) *Igneous Petrology*. Blackwell Science, Malden, 458 p.

- Blake, S. and Campbell, I. H. (1986) The dynamics of magma mixing during flow in volcanic conduits. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **94**, 72–81.
- Bloomfield, A. L. and Arculus, R. J. (1989) Magma mixing in the San Francisco volcanic field, AZ: petrogenesis of the O'Leary Peak and Strawberry Crater volcanics. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **102**, 429–453.
- Branney, M. J. and Kokelaar, P. (1992) A reappraisal of ignimbrite emplacement: progressive aggradation and changes from particulate to non-particulate flow during emplacement of high-grade ignimbrite. *Bull. Volcanol.*, **54**, 504–520.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1997) **Rock-forming minerals volume 2B Double-chain silicates, 2nd ed.**. The Geol. Soc., London, 784 p.
- Duffield, W. A. and Ruiz, J. (1992) Compositional gradients in large reservoirs of silicic magma as evidenced by ignimbrites versus Taylor Creek Rhyolite lava domes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **110**, 192–210.
- Eichelberger, J. C. (1975) Origin of andesite and dacite: evidence of mixing at Glass Mountain in California and at other circum-Pacific volcanoes. *Geol. Soc. America Bull.*, **86**, 1381–1391.
- 古川邦之・金子克哉・小屋口剛博・鎌田浩毅 (2006) 阿蘇火山における大規模および小規模噴火活動の岩石学的特徴. 月刊地球, **28**, 386–391.
- 古川邦之・三好雅也・新村太郎・柴田知之・荒川洋二 (2009) 阿蘇カルデラ北西壁に分布する先阿蘇火山岩類の地質学・岩石学的研究: 先カルデラ火山活動における噴火活動とマグマ供給系. 地質雑, **115**, 658–671.
- Hildreth, W. (1981) Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism. *J. Geophys. Res.*, **86**, 10153–10192.
- 星住英夫 (1990) 阿蘇-4/3 降下火砕物—阿蘇-4 噴出以前の阿蘇火山活動史. 日本火山学会講演予稿集, 92.
- 星住英夫・尾崎正紀・宮崎一博・松浦浩久・利光誠一・宇都浩三・内海 茂・駒沢正夫・広島俊男・須藤定久 (2004) 20 万分の 1 地質図幅「熊本」. 産業技術総合研究所, 地質調査総合センター.
- Hunter, A. G. (1998) Intracrustal controls on the coexistence of tholeiitic and calc-alkaline magma series at Aso volcano, SW Japan. *J. Petrol.*, **39**, 1255–1284.
- Ishizaki, Y. (2007) Dacite-basalt magma interaction at Yakedake volcano, central Japan: petrographic and chemical evidence from the 2300 years B. P. Nakao pyroclastic flow deposit. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, **102**, 194–210.
- 岩永将暉 (1968) 縞状軽石の成因について. 岩鉱, **59**, 125–142.
- Jellinek, A. M. and DePaolo, D. J. (2003) A model for the origin of large silicic magma chambers: precursors of caldera-forming eruptions. *Bull. Volcanol.*, **65**, 363–381.
- 鎌田浩毅 (1997) 宮原地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅). 地質調査所, 127 p.
- Kaneko, K., Kamata, H., Koyaguchi, T., Yoshikawa, M. and Furukawa, K. (2007) Repeated large-scale eruptions from a single compositionally stratified magma chamber: An example from Aso volcano, Southwest Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **167**, 160–180.
- 小屋口剛博 (1986) 苦鉄質マグマと珪長質マグマの混合機構—不均質なマグマの成因—. 火山, **30**, S41–S54.
- 町田 洋・新井房夫 (2003) 新編, 火山灰アトラス—日本列島とその周辺—. 東京大学出版会, 336 p.
- 松本哲一・宇都浩三・小野晃司・渡辺一徳 (1991) 阿蘇火山岩類の K-Ar 年代測定—火山層序との整合性と火砕流試料への適用—. 日本火山学会 1991 年度秋季大会講演予稿集, 73.
- 宮緑育夫・星住英夫・高田英樹・渡辺一徳・徐 勝 (2003) 阿蘇火山における過去約 9 万年間の降下軽石堆積物. 火山, **48**, 195–214.
- 三好雅也・古川邦之・新村太郎・下野まどか・長谷中利昭 (2009) 阿蘇カルデラ外輪山に分布する先阿蘇火山岩類の岩石記載と全岩化学組成. 地質雑, **115**, 672–687.
- 三好雅也・湯口貴史・新村太郎・森 康・荒川洋二・豊原富士夫 (2011) 阿蘇カルデラ内北西部ボーリングコア基盤岩類の岩石学的特徴および K-Ar 年代. 地質雑, **117**, 585–590.
- Miyoshi, M., Shibata, T., Yoshikawa, M., Sano, T., Shinmura, T. and Hasenaka, T. (2011) Genetic relationship between post-caldera and caldera-forming magmas from Aso volcano, SW Japan: Constraints from Sr isotope and trace element compositions. *J. Mineral. Petrol. Sci.*, **106**, 114–119.
- Mori, Y. and Mashima, H. (2005) X-ray fluorescence analysis of major and trace elements in silicate rocks using 1: 5 dilution glass beads. *Bull. Kitakyushu Mus. Nat. Hist. Hum. Hist. Ser. A*, **3**, 1–12.
- Musselwhite, D. S., DePaolo, D. J. and McCurry, M. (1989) The evolution of a silicic magma system: isotopic and chemical evidence from the Woods Mountains Volcanic Center, eastern California. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **101**, 19–29.
- 小野晃司 (1965) 阿蘇カルデラ東部の地質. 地質雑, **71**, 541–553.
- 小野晃司・松本僊夫・宮久三千年・寺岡易司・神戸信和 (1977) 竹田地域の地質. 地域地質研究報告 (5 万分の 1 地質図幅), 地質調査所, 145 p.
- 小野晃司・渡辺一徳 (1983) 阿蘇カルデラ. 月刊地球, **5**, 73–82.
- 小野晃司・渡辺一徳 (1985) 阿蘇火山地質図 (5 万分の 1). 地質調査所.
- 大鹿淳也・荒川洋二・新村太郎 (2007) 阿蘇火山, Aso-4 火砕流堆積物中の弁利スコリア流堆積物の層序の特徴と, 斑晶鉱物および石基ガラスの化学組成について. 日本火山学会 2007 年度秋季大会講演予稿集, 38.
- 関 琢磨・荒川洋二・新村太郎・大鹿淳也 (2011) 阿蘇火山, Aso-4 大鈴流堆積物中の弁別スコリア流堆積物の層序と斑晶鉱物の化学組成の対比研究. 日本火山学会 2011 年度秋季大会講演予稿集, 69.
- 新村太郎・荒川洋二 (2007) 阿蘇地域における火山岩類の Sr および Nd 同位体比の時間変化. 日本地質学会 第 114 年学術大会講演要旨, 295.
- Smith, R. L., and Bailey, R. A. (1966) The Bandelier tuff: A study of ash-flow eruption cycles from zoned magma chambers. *Bull. Volcanol.* **29**, 83–103.

- Sparks, R. S. J. and Marshall, L. A. (1986) Thermal and mechanical constraints on mixing between mafic and silicic magmas. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **29**, 99-124.
- Sparks, R. S. J., Self, S. and Walker, G. P. L. (1973) Products of ignimbrite eruptions. *Geol.*, **1**, 115-118.
- Sun, S. S. and McDonough, W. F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In *Magmatism in the Ocean Basins* (Saunders, A. D. and Norry, M. J. eds). *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, **42**, 313-345.
- Suzuki-Kamata, K., Kamata, H. and Bacon, C. R. (1993) Evolution of the caldera-forming eruption at crater lake, Oregon, indicated by component analysis of lithic fragments. *J. Geophys. Res.*, **98**, 14059-14074.
- 津久井雅志・荒牧重雄 (1990) 始良火砕噴火のマグマ溜り. *火山*, **35**, 231-248.
- 上野龍之 (2007) 入戸火砕流堆積物に認められる石質岩片濃集部の特徴と形成機構. 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, **42**, 129-147.
- Walker, G. P. L., Self, F. and Froggatt, P. C. (1981) The ground layer of the Taupo ignimbrite: a striking example of sedimentation from a pyroclastic flow. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **10**, 1-11.
- Watanabe, K. (1978) Studies on the Aso pyroclastic flow deposits in the region to the west of Aso caldera, southwest Japan, I: Geology. *Mem. Fac. Educ. Kumamoto Univ. Nat. Sci.*, **27**, 97-120.
- Watanabe, K. (1979) Studies on the Aso pyroclastic flow deposits in the region to the west of Aso caldera, southwest Japan, II: Petrology of the Aso-4 pyroclastic flow deposits. *Mem. Fac. Educ. Kumamoto Univ. Nat. Sci.*, **28**, 75-112.
- 安井真也 (1994) 浅間火山前掛期“B’降下スコリア”に記録されたマグマの不均質混合. *岩鉱*, **89**, 439-453.

(編集担当 横尾亮彦)