

阿蘇火山中岳北東麓に分布する火砕流堆積物とその層序的意義

宮 縁 育 夫*・渡 辺 一 徳**・江 川 佳 貴***

(2006年4月5日受付, 2006年6月21日受理)

A Pyroclastic Flow Deposit Occurring at the Northeastern Foot of Nakadake,
Aso Volcano (Japan) and its Stratigraphic Significance

Yasuo MIYABUCHI*, Kazunori WATANABE** and Yoshitaka EGAWA***

A basaltic pyroclastic flow deposit, the Izumikawa pyroclastic flow deposit, occurs at the northeastern foot of Nakadake Volcano, which is the only active central cone of Aso caldera, southwestern Japan. The pyroclastic flow deposit covers a fan-shaped area of about 0.9–1.9 km², and the bulk volume is estimated at 4.4–9.4 × 10⁶ m³. The deposit is poorly sorted, and consists of subangular faceted clasts and spherical cauliflower bombs set in a sandy non-cohesive matrix. The deposit forms two different facies: a black reversely graded lower unit and a reddish-gray reversely graded upper unit. The cauliflower bombs, which have slightly vesiculated crusts and denser interiors, are more abundant in the lower unit than in the upper unit. The presence of the cauliflower bombs suggests that the pyroclastic flow was generated by an explosion at the source lava lake or conduit, which was filled with mixture of solidified and molten lavas. The age of the deposit was estimated at ca. 19 cal ka, based on ¹⁴C ages obtained from charred wood fragments in the deposit. Recent tephrochronological studies reveal that Nakadake Volcano became active from ca. 22–21 cal ka and that violent scoria and ash eruptions of Nakadake were concentrated in two periods of ca. 22–21 cal ka and 18–16 cal ka. The age of the Izumikawa pyroclastic flow corresponds an intermediate period between the two violent eruption periods. A similar pyroclastic flow deposit and a basaltic lava flow were also identified. They cover immediately the Izumikawa pyroclastic flow deposit. These facts indicate that multiple violent eruptions producing pyroclastic flows and lava flows occurred in a short period at ca. 19 cal ka. Recent activity of Nakadake has been characterized by ash eruptions, strombolian eruptions and phreatomagmatic explosions. However, the presence of the Izumikawa pyroclastic flow deposit emphasizes the potential hazard induced by bomb-rich pyroclastic flows that may rush down the flanks of Nakadake Volcano.

Key words: Nakadake Volcano, pyroclastic flow deposit, cauliflower bomb, eruptive history

1. はじめに

阿蘇火山中央火口丘群の中で現在唯一活動を継続している中岳は、西暦553年以來の噴火記録があり(福岡管区気象台, 1990; 気象庁, 1996), わが国で最も活発な火山の一つである。この火山は約22~21 cal ka (以下, ¹⁴C年代の暦年較正結果を cal ka と表記する)に活動を開始したと考えられており(宮縁・他, 2004), 古期山体・新

期山体・最新期火砕丘という3つの山体を形成した(Fig. 1; 小野・渡辺, 1985)。中岳では、活動のごく初期にあたる22~21 cal kaと18~16 cal ka頃に多量の降下テフラ(スコリアと火山灰)を放出する激しい噴火活動があり(宮縁・他, 2004), 前者には古期山体の溶岩(玄武岩質)が流出している(馬場, 1999)。また、完新世に入ってから新期山体の溶岩(玄武岩質安山岩)を噴出

* 〒860-0862 熊本市黒髪 4-11-16
森林総合研究所九州支所
Kyushu Research Center, Forestry and Forest Products
Research Institute, Kurokami 4-11-16, Kumamoto
860-0862, Japan.

** 〒860-8555 熊本市黒髪 2-40-1
熊本大学教育学部
Faculty of Education, Kumamoto University, Kurokami

2-40-1, Kumamoto 860-8555, Japan.

*** 〒861-2233 熊本県下益城郡益城町惣領 900
益城中学校
Mashiki Junior High School, Souryo 900, Mashiki,
Kumamoto 866-2233, Japan.

Corresponding author: Yasuo Miyabuchi
e-mail: yasuo@affrc.go.jp

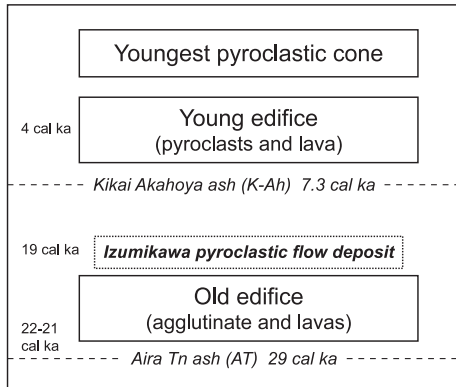


Fig. 1. Diagram showing stratigraphic relation between edifices of Nakadake Volcano, the Izumikawa pyroclastic flow deposit and key widespread tephra layers, based on previous studies (e.g. Ono and Watanabe, 1985; Miyabuchi *et al.*, 2004). All ages (cal ka) in this figure are calibrated ^{14}C ages. The ages of K-Ah and AT tephra are from Okuno (2002).

している (Fig. 2A; 小野・渡辺, 1985) が, 最近の噴火活動は黒色砂状の本質火山灰 (玄武岩質安山岩) を噴出する灰噴火によって特徴づけられる (小野・他, 1995; Ono *et al.*, 1995).

中岳火口の北北東約 4 km に位置する阿蘇火山中央火口丘群降下テフラの模式露頭 (Fig. 2B の A9418 地点; 渡辺・宮縁, 1996) の最下位には火砕流堆積物が存在し, $14,520 \pm 210$ yrs BP という ^{14}C 年代が報告されていた (渡辺, 1991; 1992). 小野・他 (1995) は, この火砕流堆積物を 中岳古期山体の崩壊の時期にあたる堆積物と考えた. しかし, 最近になって, その火砕流堆積物に関して新たな研究が実施され, 噴出年代などを見直す必要があることが判明した (Miyabuchi *et al.*, 2006).

本論では, Miyabuchi *et al.* (2006) によって報告された, この火砕流堆積物の分布や特徴を概説するとともに, 噴出年代や中岳の噴火史における意義, さらに防災上の意義についても考察する.

2. 調査地域の地質概要

調査地域は, 阿蘇火山中央火口丘群の中岳 (標高 1,506 m) および高岳 (標高 1,592 m) の北麓に位置する国立阿蘇青年の家の周辺地域である (Fig. 2). この地域には, 中岳・高岳に源を発する泉川が流れており, 標高 900 m 付近にはミヤマキリシマの名所として知られる仙酔峡がある. 700 m 付近より高標高域では, 泉川を境として東側には鷲ヶ峰の火砕岩・溶岩, 西側には楯尾岳 (鷲ヶ

峰や高岳とともに中岳より古い火山とされている) の火砕岩・溶岩が分布しており, また泉川沿いには中岳古期山体の溶岩が確認されている (小野・渡辺, 1985). さらに 700 m より低標高域は緩傾斜地となり, 扇状地堆積物からなるとされている (小野・渡辺, 1985). いずれの斜面においても火砕岩や溶岩, 扇状地堆積物の上位は, 中央火口丘群起源の降下テフラが厚く覆っており, 泉川沿いの模式露頭 (渡辺・宮縁, 1996) におけるその厚さは, 過去約 15,000 年間でも 20 m を越えている (渡辺, 1992; 宮縁・渡辺, 1997).

こうした厚い降下テフラ累層が存在するために, 1 万年より古い堆積物の露出はほとんどないが, 泉川によって下刻された溪岸斜面や道路沿いの切り取り斜面に, 本論で述べる火砕流堆積物が露出している.

3. 泉川火砕流堆積物の分布と特徴

3-1 堆積物の分布

本論で述べる火砕流堆積物は, 渡辺 (1991, 1992) によって初めて認定され, 阿蘇火山中央火口丘群起源としては, 唯一発見されている火砕流堆積物である. Miyabuchi *et al.* (2006) は, 本堆積物が中岳北東麓の泉川沿いを中心に複数の地点に露出することを確認し, Izumikawa pyroclastic flow deposit と命名した. 本論では, 泉川火砕流堆積物 (略称 IzPF) という名称を使用する.

IzPF が実際に観察できたのは, 標高 640~780 m の泉川右岸の谷壁斜面と東側に位置する尻無川右岸の谷壁斜面 (標高約 610 m) である (Fig. 2B). これらの地点より東側や西側では本堆積物を確認することができなかった. しかし, 調査地域において撮影された空中写真を判読すると, 泉川と尻無川に挟まれた斜面と起伏や開析程度が一致する地形面はさらに東方へ数 100 m 程度広がっていることがわかった. こうした地形も考慮すると, 本堆積物は標高 780 m 付近から北方へ扇状に広がる地域に分布しているものと推定される (Fig. 2B) が, 堆積物末端の正確な位置を確認することは難しい. 現在, 堆積物の露出を観察できる最下流点は標高 610 m (A0242 地点) であり, その付近を末端とすると, 分布面積は約 0.9 km^2 となる (Fig. 2B で外枠を実線で示した範囲). しかし, 現地調査では標高 550~560 m 付近に, IzPF の末端と考えられる高さ 2 m 程度の崖が認められる. IzPF がその付近まで分布すると仮定すると, その面積は約 1.9 km^2 となる (Fig. 2B に波線で示した範囲). 極端に厚い谷埋め堆積物は確認できないため, 堆積物の基底が観察できた 2 地点の状況から, 平均層厚は 5 m 程度と考えられる. これらから推定される IzPF の見かけ体積は $4.4 \sim 9.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 程度であり, 誤差を考慮しても 10^6 m^3 オー

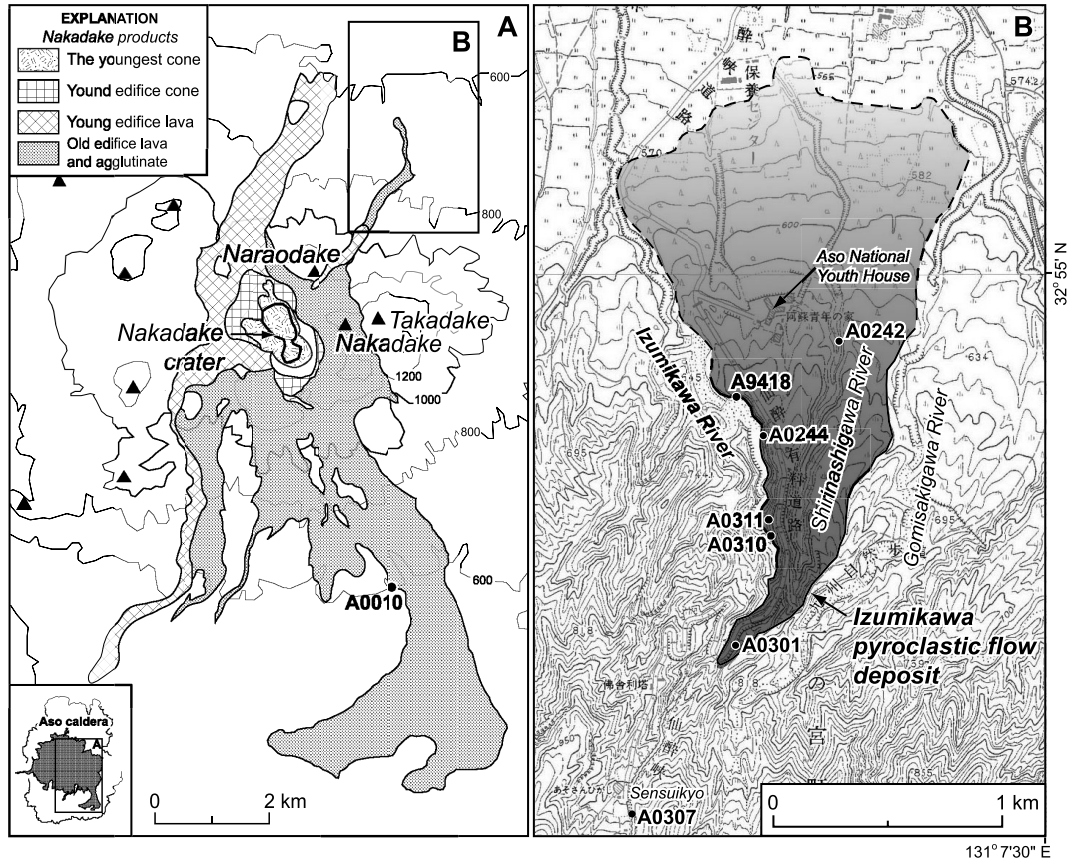


Fig. 2. Distribution maps of lava flows from Nakadake (A) and the Izumikawa pyroclastic flow deposit (B); modified from 1: 25,000 topographic map “Asosan” and “Bochu” published by Geographical Survey Institute. Solid circles show localities of measured stratigraphic sections. The distribution of lavas and agglutinate is taken from Ono and Watanabe (1985) and Baba (1999). Latitudes and longitudes are shown by Tokyo Datum.

ダーであることは間違いないであろう。

3-2 堆積物の層序

IzPF は、黒色 (N2/0; マンセル方式の標準土色帖による色調, 以下同様) を呈する下部ユニットと赤灰色 (2.5 YR4/2) を呈する上部ユニットに区分することができる (Figs. 3, 4A).

IzPF の基底が観察された A0244 地点において、堆積物直下には層厚 2 cm の淘汰のよい砂質火山灰層 (石基組織や斑晶組合せは IzPF と同じ) が存在する。その火山灰層の直下位には層厚 0.5 cm の変質岩片を含む中砂～粗砂質の降下スコリアが認められ、その下位は活動の休止期あるいは静穏期を示す埋没黒ボク土層 (層厚 8 cm 程度) となっている。一方、IzPF の上位は、固結した成層火山灰層 (層厚 28～60 cm) に直接覆われている。露頭の一部では、IzPF と固結火山灰層との間に厚さ 95 cm のラハール堆積物が挟在している (Fig. 4B)。最下位の

薄い降下スコリア層から IzPF 直上の固結火山灰層まではラハール堆積物を含めて時間間隙を示す土壤層等の堆積物が認められないため、一連の噴火による堆積物と考えられる。

なお、この IzPF を含む一連の噴火堆積物の年代、他の溶岩やテフラとの層序関係については、5 章において詳しく述べる。

3-3 堆積物の産状

IzPF はいずれの地点においても、火山岩塊および火山礫とそれらを埋める基質からなる淘汰の悪い堆積物である。また、この堆積物は黒色の下部ユニットと赤灰色の上部ユニットからなり、両者ともにカリフラワー状火山弾 (Fisher and Schmincke, 1984, p. 92; Alvarado and Soto, 2002) を多量に含む bomb-and-ash flow deposit であることが特徴である (Miyabuchi *et al.*, 2006)。

IzPF の基底から最上部まで観察できる A0244 地点に

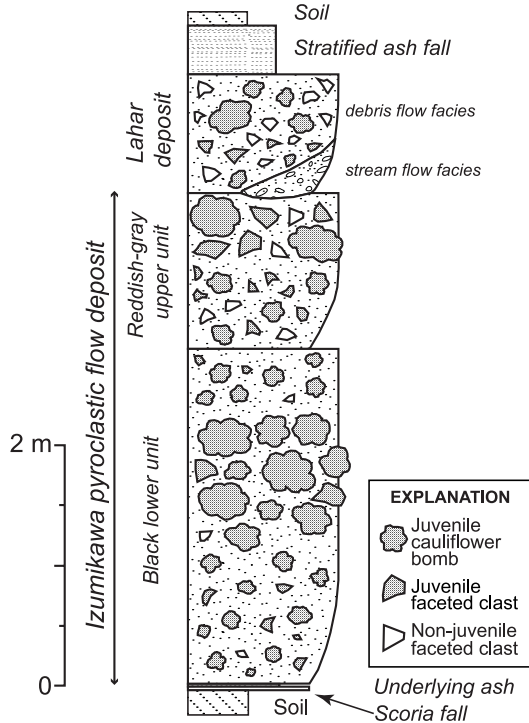


Fig. 3. Schematic stratigraphic section (locality A0244) of the Izumikawa pyroclastic flow deposit and related deposits.

における本堆積物の特徴は、以下のとおりである (Fig. 3)。この地点では、IzPF は層厚約 280 cm の黒色下部ユニットと層厚 130 cm の赤灰色上部ユニットに区分される (Figs. 4A, 4B)。

下部ユニットは全体的に逆級化構造をしているが、最上部 50 cm は火山岩塊 (以下、岩塊とよぶ) に乏しい。この下部ユニットに含まれる岩塊は、丸みを帯びたカリフラワー状火山弾と亜角礫～亜円礫の形状を呈する緻密な岩片 (以下、角張った岩片とよぶ) からなるが、本地点においては前者が大半を占めている。それらの岩塊は基底から 130～230 cm 付近に集中しており、最大粒径 (ML: 露頭における最大岩片 3 個の長径平均値) は前者が 32 cm で後者が 30 cm であった。

上部ユニットも全体的に逆級化構造をしており、上部 50 cm に岩塊が集中している。カリフラワー状火山弾と角張った岩片がともに含まれ、このユニットにおいては後者が大部分を占めている。ML は前者が 45 cm、後者が 28 cm である。また、このユニット中の岩塊は、下部ユニットよりも角張ったものが多い。さらに、類質物質と考えられる変質岩片が下部ユニットよりも多く認められ、それらは本質岩片よりも角張っていることが特徴で

ある。

どの地点においても色調の異なる下部ユニットと上部ユニットとの境界は比較的明瞭であるとともに、岩塊の構成物質の割合や形状も違うことから、両者は異なるフロユニットによって堆積した可能性が高い。また、両ユニット間に時間間隙を示す土壤層等の堆積物は見当たらない。

4. 泉川火砕流堆積物の構成物質

4-1 構成物質

IzPF 下部・上部ともに含まれる岩塊は、丸みを帯びたカリフラワー状の火山弾と角張った岩片からなる (Fig. 4C)。

火山弾は表面に多数の皺が入った、特徴的なカリフラワー状の表面形態を有する玄武岩質 (化学組成については後述) の火砕物である。この火山弾を切断した断面を観察すると、内部は比較的緻密であるが、表面から 1～1.5 cm の部分は微細な気泡 (大部分 1 mm 以下) が多数認められる (Fig. 4D)。内部の緻密な部分と外部のやや発泡した部分の境界は比較的明瞭である。その境界付近には大きな気泡 (最大 3 mm) が集中しており、それらの気泡は内部方向への成長が妨げられ、外部へ膨らんでいる様子が観察された。

これらの特徴から、IzPF 中に認められるカリフラワー状火山弾は緻密な石質岩片を核にもつ *cored bomb* (Macdonald, 1972, p. 127-128) に類似するものであると判断される。発泡度に大きな違いはあるものの、内部と外部 (殻) とでは斑晶組合せや量比、石基部分の結晶度などは酷似していることから、両者はともに同じマグマから供給された本質物質であり、一度冷え固まった溶岩の表面に、塑性変形可能なマグマが付着した結果、こうした火山弾が生成されたと考えられている (Miyabuchi *et al.*, 2006)。

一方、角張った岩片は比較的平らな破断面を持つ緻密な玄武岩質の岩片である。この緻密な岩片は、カリフラワー状火山弾と同じ岩石学的特徴を有するものと赤色に酸化したり、変質が認められるものの 2 つに大別され、後者は類質物質と推定される。

IzPF の火山岩塊および火山礫間を埋める基質は、非凝集性の砂質火山灰である。その火山灰粒子は、石基片や結晶片、変質した岩片などからなるが、石基片の大部分は *blocky texture* を有しており、発泡が悪いことが特徴である (Miyabuchi *et al.*, 2006)。

4-2 堆積物の粒度組成

IzPF の粒度組成を明らかにするため、A0244 および A0301 地点において -5 φ (32 mm) 以下の試料を採取

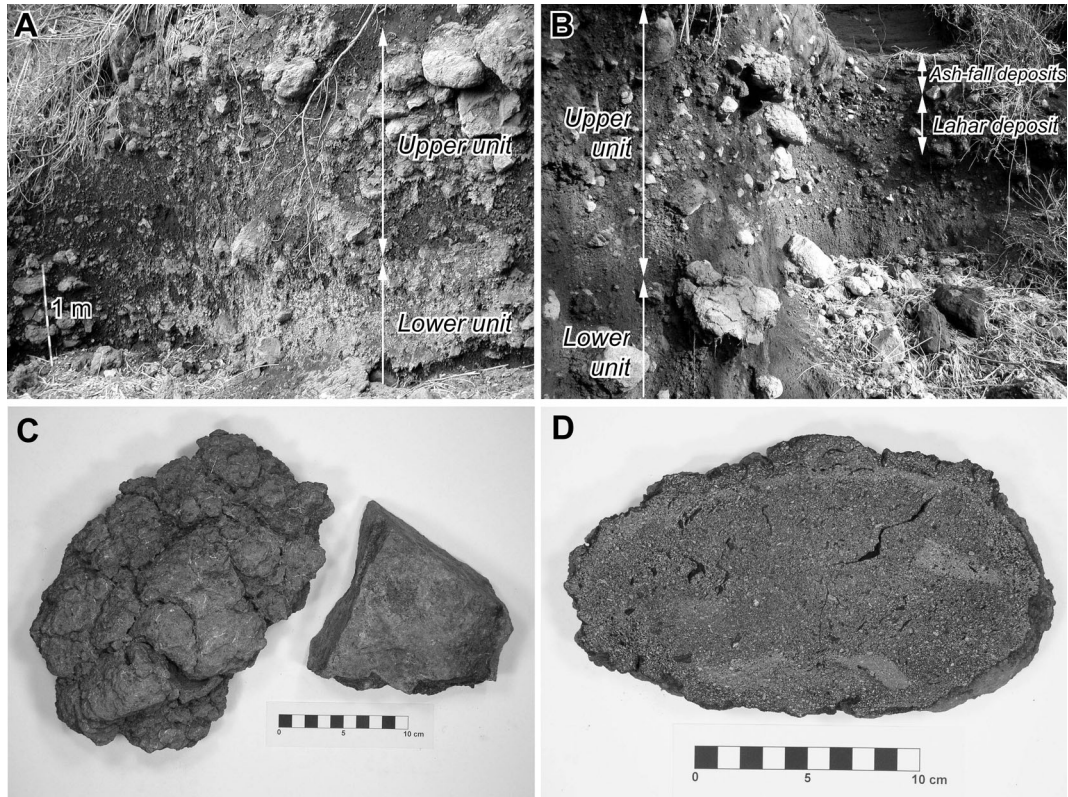


Fig. 4. Photographs of the Izumikawa pyroclastic flow deposit. (A) The Izumikawa pyroclastic flow deposit showing two different facies: a black reversely graded lower unit and a reddish-gray reversely graded upper unit at locality A0244. (B) The Izumikawa pyroclastic flow deposit overlain by a lahar deposit and ash-fall deposits at locality A0244. (C) A cauliflower bomb (left) and a subangular faceted block (right) sampled from the lower unit of IzPF at locality A0301. (D) Cross section of a cauliflower bomb.

し、粒度分析を行った。採取した試料は乾燥（105℃で約24時間）後、 $-5\phi\sim5\phi$ （ 1ϕ 間隔）のふるいによって分離した。

両地点における堆積物の粒度分析結果を Fig. 5 に示した。IzPF は下部・上部ユニットともに淘汰の悪い堆積物であり、ユニモーダルからバイモーダル型の粒度分布を有している。黒色の下部ユニットでは最上部が $1\sim2\phi$ 、中央部が $-4\sim-3\phi$ 、最下部が $1\sim2\phi$ にピークが存在している。赤灰色の上部ユニットでは $-3\sim-2\phi$ の礫成分にピークがあるが、基底に近い部分では $0\sim3\phi$ の砂成分にピークが認められる。これらの粒度分析結果は、逆級化構造を示す現地での産状とおおむね一致している。また、 4ϕ 以下のシルト・粘土成分の割合は $3\sim10\%$ 以下と少なく、細粒物質に乏しいことが特徴である (Miyabuchi *et al.*, 2006)。

4-3 岩石学的特徴

IzPF に含まれる角張った岩片およびカリフラワー状

火山弾試料の岩石薄片を作成し、偏光顕微鏡下で観察した。本質物質と考えられる角張った緻密な岩片、カリフラワー状火山弾に含まれる斑晶の量は、いずれも体積比で $35\sim40\%$ 程度である。苦鉄質鉱物のおおよその量は、どちらも単斜輝石 > かんらん石 >> 斜方輝石であった。石基部分は、斑晶と同種の微晶とガラスからなる充填状組織をしている。

また、IzPF 中の岩塊および中岳起源の溶岩について、それらの全岩化学組成を測定した。分析に使用したのは、IzPF 下部ユニットの角張った岩片 4 試料と火山弾 2 試料、上部ユニットから角張った岩片 3 試料、さらに調査地域周辺に分布する中岳起源と考えられる溶岩の 4 試料である。試料はメノウ乳鉢で微粉砕後に電気炉を用いて 450°C で 1.5 時間灼熱し (Yoshida, 1987)、1:10 希釈のガラスビードを作成した。全岩化学組成の測定は、九州沖縄農業研究センター所有の蛍光 X 線分析装置 (理化学電機工業株式会社システム 3070) で行った。

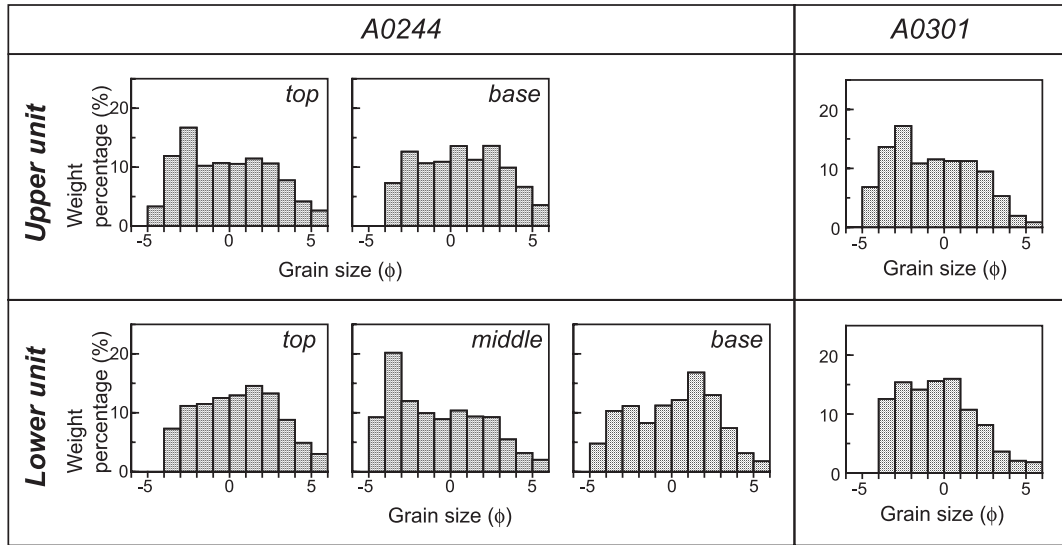


Fig. 5. Grain size histograms of Izumikawa pyroclastic flow deposit sampled at localities A0244 and A0301.

Table 1. Whole rock chemical compositions of blocks and bombs in the Izumikawa pyroclastic flow deposit and of lavas from Nakadake Volcano.

| Unit | <i>Reddish-gray upper unit of Izumikawa pyroclastic flow deposit</i> | | | <i>Black lower unit of Izumikawa pyroclastic flow deposit</i> | | | | | | <i>Lava of Nakadake old edifice</i> | | <i>Shirinishi-gawa lava</i> | <i>Sensuikyo lava</i> |
|--------------------------------|--|------------------------|------------------------|---|------------------------|------------------------|------------------|------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------|-----------------------------|-----------------------|
| Sample No. | A0244IZUC | A0301IZUC2 | A0242IZUC1 | A0244IZLC | A0301IZLC1 | A0242IZLC1 | A0244IZLB | A0301IZLB | A0301IZLC2 | A0010NOL | A0310NOL | A0242SL | A0307L |
| | juvenile faceted block | juvenile faceted block | juvenile faceted block | juvenile faceted block | juvenile faceted block | juvenile faceted block | cauliflower bomb | cauliflower bomb | non-juvenile faceted block | Lava | Lava | Lava | Lava |
| SiO ₂ | 51.42 | 50.07 | 51.04 | 50.35 | 49.89 | 50.48 | 50.11 | 49.59 | 55.57 | 53.21 | 49.77 | 52.58 | 51.79 |
| TiO ₂ | 0.94 | 0.91 | 0.92 | 0.88 | 0.86 | 0.93 | 0.92 | 0.91 | 0.93 | 0.88 | 0.94 | 0.87 | 0.98 |
| Al ₂ O ₃ | 18.53 | 17.95 | 18.02 | 17.95 | 17.52 | 18.22 | 17.80 | 17.34 | 18.27 | 17.21 | 17.83 | 16.40 | 16.46 |
| Fe ₂ O ₃ | 11.14 | 11.37 | 10.95 | 11.04 | 11.14 | 10.90 | 11.25 | 11.54 | 8.78 | 10.41 | 11.57 | 10.71 | 10.55 |
| MnO | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.16 | 0.17 | 0.17 | 0.17 | 0.18 | 0.15 | 0.16 | 0.18 | 0.17 | 0.17 |
| MgO | 5.25 | 5.71 | 5.22 | 5.97 | 6.24 | 5.21 | 5.89 | 6.24 | 3.12 | 5.11 | 5.84 | 6.37 | 5.45 |
| CaO | 10.67 | 10.53 | 10.63 | 10.60 | 10.45 | 10.61 | 10.57 | 10.58 | 7.78 | 9.36 | 11.14 | 9.15 | 9.41 |
| Na ₂ O | 2.26 | 2.38 | 2.36 | 2.25 | 2.21 | 2.36 | 2.32 | 2.32 | 2.85 | 2.53 | 2.26 | 2.38 | 2.43 |
| K ₂ O | 0.73 | 0.74 | 0.76 | 0.69 | 0.67 | 0.75 | 0.71 | 0.72 | 1.66 | 0.99 | 0.81 | 1.39 | 1.47 |
| P ₂ O ₅ | 0.15 | 0.16 | 0.15 | 0.14 | 0.14 | 0.16 | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.16 | 0.18 | 0.16 | 0.16 |
| Total | 101.27 | 99.99 | 100.22 | 100.04 | 99.27 | 99.79 | 99.89 | 99.58 | 99.27 | 100.01 | 100.51 | 100.17 | 98.86 |

IzPF 下部ユニットに含まれるカリフラワー状火山弾 SiO₂ = 49.6~50.1 wt. %, 角張った岩片 SiO₂ = 49.9~50.5 wt. %, 上部ユニット中の角張った岩片は SiO₂ = 50.1~51.4 wt. % と、いずれも玄武岩組成であった (Table 1, Fig. 6). 堆積物中に多量に存在するカリフラワー状火山弾は、その形状からみても本質物質であることは明らかであり、それとほぼ同じ化学組成を有する角張った岩片も本質物質と考えて間違いないであろう。一方、IzPF 中に含まれる斑晶量 (25%) や苦鉄質鉱物量比 (変質したかんらん石 > 単斜輝石 > 斜方輝石) が異なる角張った岩片の代表的なものを採取して分析した結果、SiO₂ = 55.6 wt. % と安山岩組成であった。この岩片は火口壁を構成していたか、あるいは火砕流が流動中に取り込んだ類質物質と推察される。さらに、中岳から流出したと考えられる溶岩 (古期山体の溶岩類; 小野・渡辺, 1985) は

SiO₂ = 48.9~53.2 wt. % と玄武岩~玄武岩質安山岩の組成を示した。

IzPF 中の本質物質であるカリフラワー状火山弾と角張った岩片は他の元素をみても、FeO* = 9.8~10.4 wt. %, CaO = 10.4~10.7 wt. %, K₂O = 0.7~0.8 wt. % 付近に集中しており、中岳起源の溶岩とはやや違った分析値となっている。しかし、それらの岩石はすべて中岳噴出物の組成バリエーションに含まれる比較的まとまった化学組成を有している (Fig. 6).

5. 溶岩流およびテフラとの層序関係と年代

泉川火砕流堆積物と他の溶岩流やテフラとの層序関係を明らかにするため、本堆積物の分布域およびその周辺域において現地調査を行った (Figs. 2, 7).

泉川沿いの A0311 地点では、IzPF の 4.5 m 下位に中

岳古期山体の溶岩（小野・渡辺，1985）が存在している。中岳の南麓には、中岳古期山体の溶岩と広域テフラである始良 Tn 火山灰（略称 AT；町田・新井，1976，1992）との層序関係を確認できる模式地点（Fig. 2A の A0010 地点）がある（馬場，1999）。この A0010 地点では AT の降下堆積後あまり大きな時間間隙をおかずに、火山灰やスコリアを放出する噴火が始まり、その一連の噴火中に中岳古期山体の溶岩が流出したことが観察できる（Fig. 7）。このことから、中岳古期山体の溶岩の噴出年代は AT の噴出年代である約 29 cal ka（奥野，2002）の少し後と推定されている（馬場，1999）。小野・渡辺（1985）が中岳古期山体の溶岩としている溶岩の中で北麓（A0301 地点）および南麓（A0010 地点）で採取したものは、いずれも肉眼・鏡下の観察では岩相が酷似しており、含まれる苦鉄質鉱物の量比も単斜輝石 > かんらん石 > 斜方輝石と一致している。しかし、化学組成は前者が $\text{SiO}_2 = 49.8 \text{ wt. } \%$ 、後者が $\text{SiO}_2 = 53.2 \text{ wt. } \%$ と差が認められた（Table 1）。したがって、南北両山麓に分布する中岳古期山体の溶岩（小野・渡辺，1985）は単一の溶岩ではなく、複数の溶岩流を総称している可能性がある。

阿蘇火山中央火口丘群起源の降下テフラが厚く堆積するカルデラ東区域では、AT の数 m 上位に山崎第 20～第 15 スコリア（略称 YmS20～YmS15）と命名されたスコリアと火山灰の厚い累層があり、それらは約 22～21 cal ka という比較的短時間に噴出したことがわかっている（宮縁・他，2004）。それらのテフラとの層序関係から、中岳南麓に存在する古期山体の溶岩は YmS20 から YmS15 中のどこかの層準に挟在し、その噴出年代は 22～21 cal ka とされている（Fig. 7）。

IzPF 直上の固結火山灰層の上位には、薄い埋没土壌層間に数枚の火山灰層が挟在している。それらのテフラ中には、赤褐色の降下スコリア層（層厚 10～20 cm）と軽石（最大粒径 0.5 cm 程度）が散在する成層火山灰層（層厚 8～12 cm）があり、IzPF を認定する際のよい手がかりとなっている（Fig. 7）。しかし、カルデラ東区域において、これら 2 つの鍵層や泉川火砕流に伴う降下テフラに対比できるものは確認できていない。

A0311 地点では、鍵層である赤褐色スコリアおよび軽石を含む火山灰層の上位に、別の玄武岩質火砕流堆積物（層厚 5.1 m）がある（Fig. 7）。この堆積物も黒色の下部ユニット（層厚 3.3 m）と赤灰色の上部ユニット（層厚 1.8 m）に分けられ、両ユニットともにカリフラワー状火山弾と角張った岩片が含まれるなど、IzPF と酷似した特徴をもっている。本論では、この堆積物を小堀牧火砕流堆積物（新称）と命名する。

また、尻無川のガリー内に位置する A0242 地点（Fig.

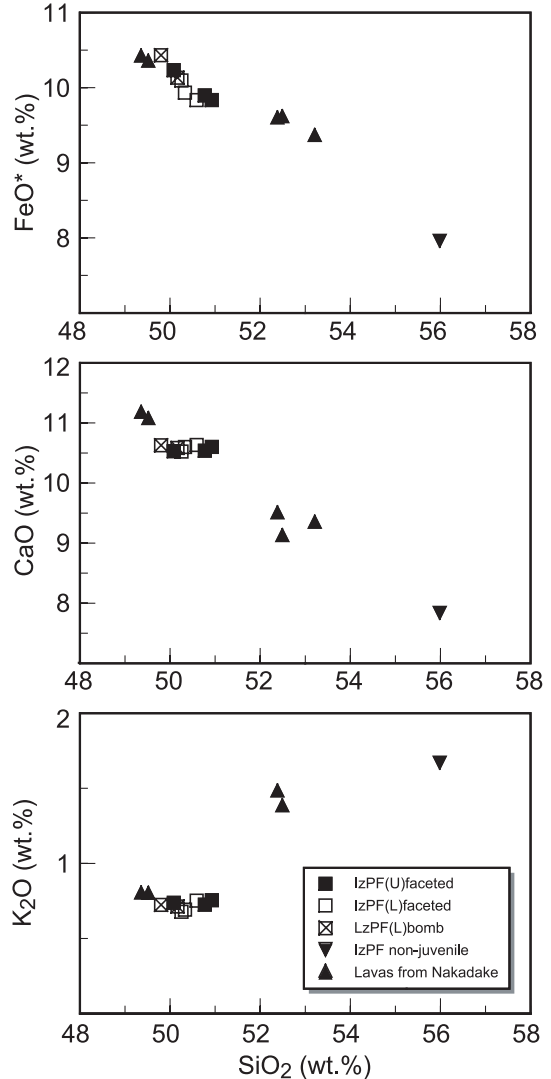


Fig. 6. SiO_2 variation diagrams for major elements of whole rock chemistry of the Izumikawa pyroclastic flow deposit (IzPF) and the Nakadake lavas.

2B) では、IzPF の約 2 m 上位に溶岩が存在している（Figs. 7, 8）。その溶岩はマッシュな岩体（厚さ 4 m）の下位に厚さ 1.4 m のクリンカーを伴っている。薄片観察によると、苦鉄質鉱物として単斜輝石 > 斜方輝石 > かんらん石を含む玄武岩質（ $\text{SiO}_2 = 52.6 \text{ wt. } \%$ ）溶岩であり、最大 4 mm 程度の大きな斜長石斑晶を有することが特徴である。この溶岩は、中岳古期山体の溶岩（小野・渡辺，1985）と化学組成は類似しているものの（Table 1）、斑晶の大きさや苦鉄質鉱物の量比が若干異なっている。そのため現段階では、この溶岩を中岳古期山体の溶岩とは異

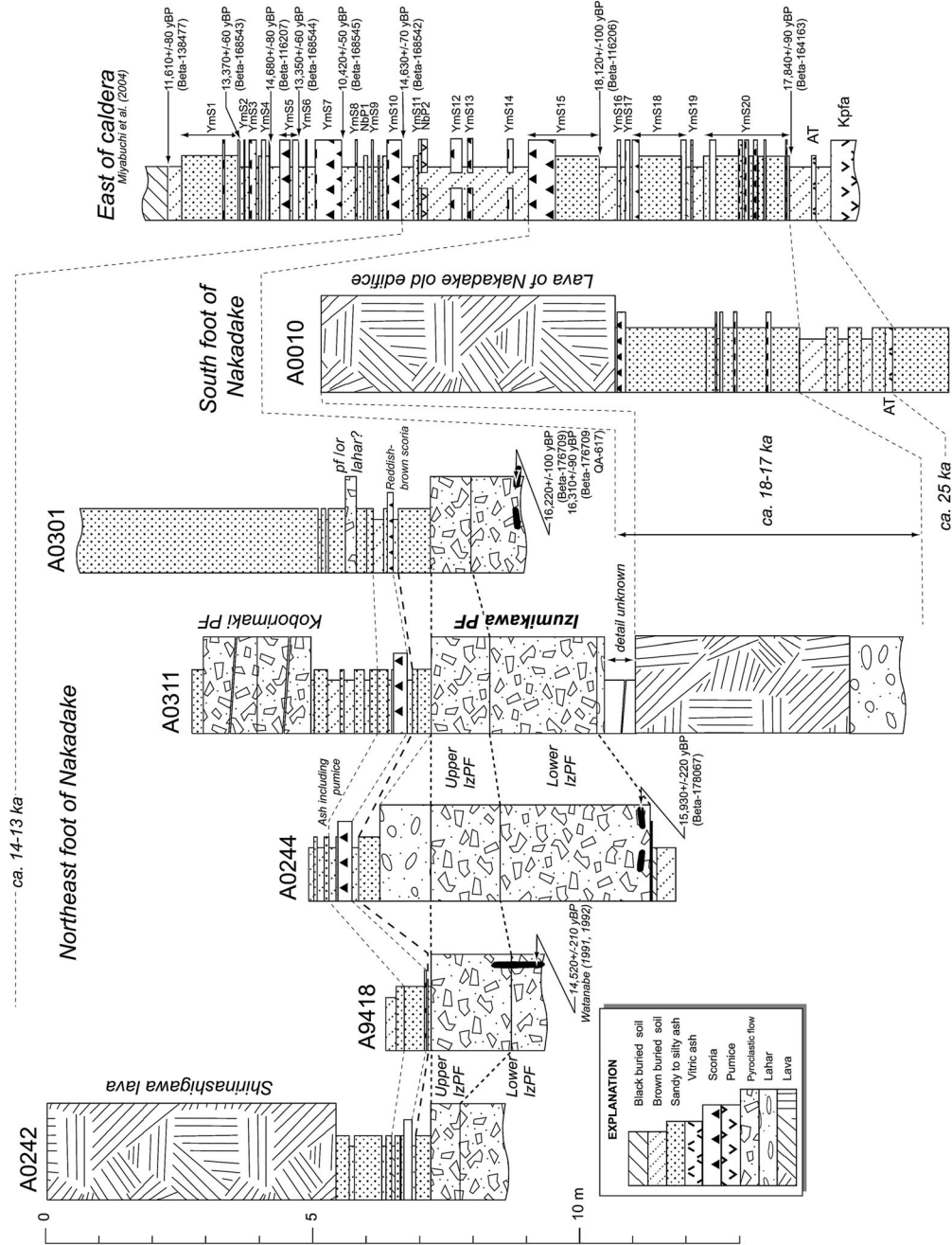


Fig. 7. Stratigraphic correlation of the Izumikawa pyroclastic flow deposit (IzPF), lava flows and tephra layers. See Fig. 2 for localities of stratigraphic sections. All ages in this figure are ¹⁴C ages. The ¹⁴C age of IzPF at locality A9418 is from Watanabe (1991, 1992). Schematic stratigraphic section of tephra layers at the east of caldera is from Miyabuchi et al. (2004).

なるものと考え、観察地点の名称をとって尻無川溶岩と呼んでおく。ただ、この溶岩と前述の小堀牧火砕流堆積物との上下関係はわかっていない。

泉川火砕流堆積物について、Miyabuchi *et al.* (2006) が新たな試料を採取して β 線計数法と加速器質量分析(AMS)法による ^{14}C 年代測定を行っている。その結果はTable 2に示すとおりで、3つの ^{14}C 年代値は 1σ の誤差範囲内でも重なっており、較正暦年代は19,970~18,230 cal yrs BP (2 σ)となっている。この新たな ^{14}C 年代値は、渡辺(1991, 1992)が報告した $14,520 \pm 210$ yrs BPよりも1,400~1,800年程度古いものであった。この理由についてはよくわからないが、渡辺(1991, 1992)が年代測定を行った炭化木片試料からは何らかの原因で実際よりも若い年代が得られたものと推定される。したがって、本論では年代値が集中する約19 cal kaをIzPFの噴出年代として採用することにした。この年代値は他の噴出物との層序関係(Fig. 7)からみても矛盾はない。

6. 議 論

6-1 泉川火砕流をもたらした噴火の推移

泉川火砕流堆積物は上位と下位にそれぞれ火山灰層を伴っており、それら全てを観察できるA0244地点での全層厚は約5.5 mである(Fig. 3)。その一連の噴火堆積物の最下部には層厚0.5 cmの中砂~粗砂質の褐色スコリア層が存在している。このスコリア層には白色の変質岩片が多量に含まれており、中岳周辺でよく認められるマグマ水蒸気爆発堆積物(渡辺, 1992)に類似した岩相を示している。こうしたことから、この褐色スコリア層はマグマ水蒸気爆発によって火口を形成したフェーズの堆積物なのかもしれない。それから乾燥した砂質火山灰(IzPF中の基質火山灰と同じ岩石学的特徴を有するもの)を放出する噴火が継続した直後に泉川火砕流が発生している。

前述したように、IzPFは2つのフローユニットに区分することができるが、黒色を呈する下部ユニットはカリフラワー状火山弾を多量に含むことが特徴である。類似した火山弾を含む火砕流は、世界のいくつかの火山で報告されている。その中で、IzPFの産状や火山弾の内部構造は、溶岩湖をもつ火砕丘火口壁の重力的崩壊で発生したコスタリカArenal火山の火砕流堆積物(Alvarado and Soto, 2002; Cole *et al.*, 2005)に酷似しているため、泉川火砕流もArenal型火砕流と類似した発生過程が想定される。しかし、IzPF中に含まれるblockyな火山灰粒子の存在はマグマと水との接触を示唆していること(Heiken and Wohletz, 1985, p. 85-107)から、半固結した溶岩湖や火道でマグマ水蒸気爆発などが起こって、固結

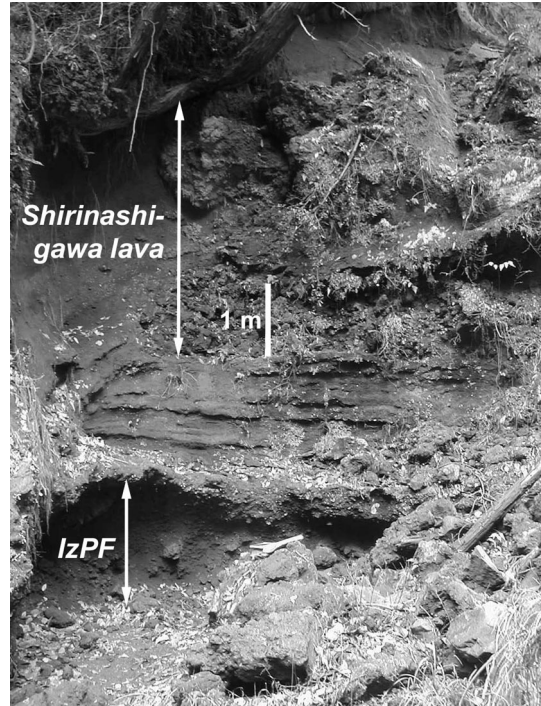


Fig. 8. Photograph showing stratigraphic relation of Izumikawa pyroclastic flow deposit (IzPF) and Shirinashigawa lava at locality A0242.

した溶岩が粉碎される(角張った本質岩片が生成)とともにカリフラワー状火山弾(すでに冷え固まった溶岩のまわりに塑性変形可能なマグマが付着して形成)が生成され、それらを含む火砕流が流下したと推定されている(Miyabuchi *et al.*, 2006)。

さらに、ほとんど時間間隙をおかずに、赤灰色を呈する上部ユニットを堆積させる火砕流が発生している。このユニットに関しても下部ユニットと同様の噴火プロセスが想定されているが、下部ユニットよりも多くの類質岩片が含まれることから、火口壁の崩壊を伴った可能性がある(Miyabuchi *et al.*, 2006)。上部ユニットが赤灰色を呈する理由としては、このユニットが下部ユニットよりも高温であったためか、あるいは火砕流発生前に溶岩湖の固結部分が赤色酸化していたことなどが考えられるが、詳細は不明である。

泉川火砕流の堆積直後、IzPFが降雨によって二次移動するラハールが、一部の斜面で発生し、流下途中で河道沿いの類質岩片を取り込んで運搬して泉川沿いなどに堆積した。その後も火山灰を放出する噴火が継続し、周辺地域に固結した成層火山灰層(層厚28~60 cm)を堆積させて、一連の噴火は終了したと考えられる。

Table 2. Results of ^{14}C age determinations for charcoal in the lower part of the Izumikawa pyroclastic flow deposit (Miyabuchi *et al.*, 2006).

| Sample | Sampling site | ^{14}C age* (yrs BP) | $\delta^{13}\text{C}$ (‰) | Conventional ^{14}C age** (yrs BP) | Lab code | Calibrated result*** (2 σ : 95% probability) |
|--------------------------------------|---------------|----------------------------------|------------------------------|--|--------------------------|--|
| Charred wood fragments [#] | A0244 | 15,950 ± 220 | -26.4 | 15,930 ± 220 | Beta- 178067 | 19,830 - 18,230 cal BP |
| Charred wood fragments [#] | A0301 | 16,210 ± 100 | -24.7 | 16,220 ± 100 | Beta- 176709 | 19,890 - 18,820 cal BP |
| Charred wood fragments ^{##} | A0301 | 16,300 ± 90 | -24.7 | 16,310 ± 90 | Beta- 176709 (QA-617) | 19,970 - 18,950 cal BP |

* ^{14}C ages were analyzed based on the Libby's ^{14}C half life of 5,568 years.

** Conventional ^{14}C ages were calculated using $\delta^{13}\text{C}$ values.

***Using the program (Talma and Vogel, 1993) based on calibration data sets (Stuiver *et al.*, 1998).

[#] measured by radiometric method

^{##} measured by AMS method

堆積物の層序関係や構成物質から、泉川火砕流をもたらした噴火は以上のような推移をたどったと推定された。しかし、このような噴火推移となった原因や、火砕流発生のタイミングなどについては、今後詳しい検討を行わなければならない。

6-2 中岳の噴火活動史における泉川火砕流噴火の位置づけ

本論で述べる泉川火砕流は、堆積物の分布から泉川沿いを流下したことは明らかであり、その上流部に位置する中岳、高岳や榎尾岳が給源として考えられる。しかし、榎尾岳は中岳よりも古い火山であり（小野・渡辺, 1985）、高岳の溶岩流も中岳古期山体の溶岩流よりも古い可能性が高いことが判明している（馬場, 1999）。また、約 19 cal ka という噴出年代からみても、泉川火砕流の噴出源は中岳以外には考えにくい。本章では、中岳の噴火活動史の中での泉川火砕流噴火の位置づけについて考察する（Fig. 9）。

中岳は約 29 cal ka（奥野, 2002）の AT 降下堆積以降に活動を開始したことがわかっており（馬場, 1999）、カルデラ東方域でのテフラ層序との対比や較正暦年代から、具体的な活動開始時期は 22~21 cal ka 頃とされている（宮縁・他, 2004）。中岳山体の主要部分は古期山体と呼ばれており、火山体中心付近に存在するアグルチネートなどの火砕岩と山麓まで流下する溶岩流から構成されている（小野・渡辺, 1985）。中岳南麓（A0010 地点）での溶岩流と AT 火山灰との層序関係（馬場, 1999）から、その溶岩流は中岳活動のごく初期にあたる 22~21 cal ka 頃に流出したことがわかっており。また同じ時期にはスコリアや火山灰を多量に放出し、カルデラ周辺域に厚い降下テフラ累層（スコリアと火山灰の互層；YmS20~YmS15）を堆積させており、その時期のテフラ噴出量は約 0.8 km³（溶岩換算量；DRE）に達している（宮縁・

他, 2004）。

その後、18~16 cal ka には主に降下スコリアを放出する爆発的な噴火が間欠的に発生しており、それらテフラ（山崎第 10~第 1 スコリア；YmS10~YmS1）の総量は 0.5 km³ 程度である。泉川火砕流が噴出したのは、22~21 cal ka のスコリアと火山灰を大量に噴出し、古期山体の溶岩を流出した時期と 18~16 cal ka の主に降下スコリアをもたらす爆発的な噴火が間欠的に発生した時期とのちょうど中間にあたる 19 cal ka 頃である。中岳の噴火史における降下テフラの噴出量からみて、むしろテフラ噴出量の少ない時期（21~18 cal ka の 3,000 年間）に相当し、そのような時期にも 10⁶ m³ オーダーの火砕流を噴出していることが、筆者らの調査で明らかになった。また、泉川火砕流発生の少し後には岩相が酷似した別の火砕流（小堀牧火砕流）が流下しており（Fig. 7）、中岳では 19 cal ka 前後の時期に複数回にわたって、カリフラワー状火山弾に富む玄武岩質火砕流が発生していることが判明した。

さらに、中岳北麓では泉川火砕流堆積物の上位から一つの溶岩流（尻無川溶岩）が発見され（Figs. 7, 8）、これも時代的には泉川火砕流の少し後に流出したものと考えられる。また、詳しい層序関係は不明であるが、仙酔峡（A0307 地点）に分布する溶岩は、中岳古期山体の溶岩と苦鉄質鉱物の量比が若干異なることがわかった（単斜輝石 > 斜方輝石 > かんらん石）。しかし、これらの溶岩は産状や化学組成が中岳古期山体の溶岩と類似した特徴もっている。したがって、これまでの研究（小野・渡辺, 1985 など）では、噴出年代・岩相・化学組成が若干異なるいくつかの溶岩を一括して、中岳古期山体の溶岩と呼んでいた可能性が高い。そうした定義をある程度踏襲するのであれば、中岳古期山体の主な形成時期はごく短期間ではなく、少なくとも 22~19 cal ka の約 3,000 年間あ

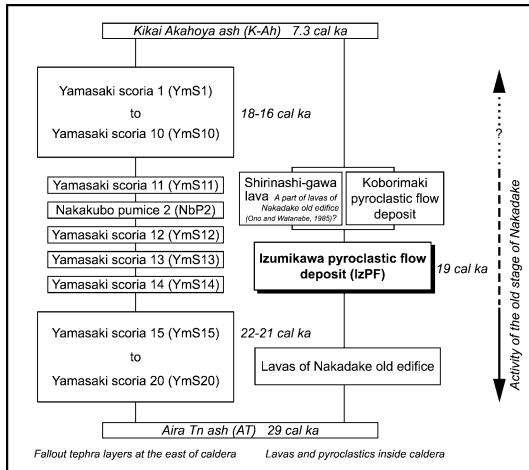


Fig. 9. Stratigraphic relation between the Izumikawa pyroclastic flow deposit, lava flows and fallout tephra layers from Nakadake. Vertical tielines show relationships confirmed at outcrops. All ages (cal ka) in this figure are calibrated ^{14}C ages.

るいはそれ以上の時期にわたると考えるべきであろう。この定義を使うのであれば、本論で述べた泉川火砕流も中岳古期という活動時期に噴出したことになる (Fig. 9)。

カルデラ周辺域でのテフラ層序に関する研究 (宮縁・他, 2003, 2004) や本研究によって、中岳では2つの大規模スコリア噴火が卓越する時期の間に、複数回の苦鉄質火砕流噴火のステージが存在することが明らかになった。どうしてそのような時期に火砕流噴火が発生したのかは、火山学的に興味深い問題である。この問題については、今後さらにデータを蓄積して噴出物の層序関係や特徴、マグマの組成、噴出率などの時間的変化にもとづいて議論しなければならない。

これまで IzPF は中岳古期山体の崩壊時期にあたる堆積物と考えられてきた (小野・他, 1995)。しかし、古期山体の崩壊地形は西方に開いており、北側にはリッジが残されているので、崩壊に関連する堆積物は崩壊壁よりも西方に分布する可能性が高く、北東山麓に分布する IzPF は崩壊に伴う堆積物とは考えられない。また、古期山体の北側リッジの標高は 1,350~1,500 m であり、地形に大きな影響を受ける発泡の悪い岩片を多量に含む火砕流の流下特性からみて、泉川火砕流の発生源は北側リッジよりも高い地点を想定しなければならない。したがって、泉川火砕流の発生時期には現在の北側リッジよりも高標高域まで古期山体が存在したものと考えられる。カルデラ東方域では中岳の溶岩と同質の岩片を多量に含む降下スコリア (山崎第5スコリア; YmS5) が発見されて

おり、そのテフラの年代は 18~16 cal ka である (宮縁・他, 2004)。この降下テフラが中岳古期山体の崩壊に関連する噴出物であるという確実な証拠は得られていないが、そうであると仮定すると、その崩壊時期は泉川火砕流発生後の 18~16 cal ka 頃ということになる。この仮定は、泉川火砕流の発生源が崩壊前の中岳古期山体の一部であるという考えとも調和している。

6-3 泉川火砕流堆積物発見の防災上の意義

現在の中岳は、濃褐色または黒色の噴煙を継続的あるいは短い間隔で繰り返し放出して黒色砂状の火山灰を周辺地域に降下させる灰噴火が最も特徴的な噴火スタイルとなっている (小野・他, 1995; Ono *et al.*, 1995)。さらに活発な時期には、スコリアを間欠的に放出するストロンボリ式噴火を起こす。また活動期の火口内が湖水や水で飽和した土砂で閉塞された場合には、水蒸気爆発あるいはマグマ水蒸気爆発が起こることがあり、防災上最も注意すべき現象である (渡辺, 1993)。そうした水蒸気爆発やマグマ水蒸気爆発の際には、低温火砕流や火砕サージが発生することがあり、これまでも 1958 年や 1979 年の噴火時に確認されている (種子田・他, 1959; 小野・他, 1982)。それらの分布域は中岳火口から 1~1.5 km 以内の範囲であり、そのことは現在のハザードマップ (阿蘇火山防災会議協議会, 1995) でも考慮されている。

しかし、泉川火砕流堆積物の発見によって、中岳ではかつて発泡の悪い岩塊や火山弾に富む火砕流が発生し、地形的低所を流れ下り、4 km 以遠の山麓にまで達していたことが明らかとなった。その堆積物量は $4.4\sim 9.4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 程度であり、これは雲仙火山 1990~1995 年噴火で発生した最大規模のドーム崩落型火砕流の体積 (Nakada *et al.*, 1999; Fujii and Nakada, 1999) と同じオーダーである。こうした火砕流は、地質学的には小規模火砕流に分類されるが、多大な人的・物的被害をもたらす火山現象の一つである。今回の調査によっては確認できなかったが、火砕流はより希薄な火砕サージを伴うことがあり、それらは火砕流よりも広範囲に拡散することも予想される。現在、中岳火口が存在する最新期火砕丘の北東~東側には古期山体のリッジがあり、そのリッジが地形的な障壁となるため、発泡の悪い火砕流が中岳北東斜面を流下する可能性は泉川火砕流発生当時よりも低いかもしれない。しかし、噴火がより爆発的で噴煙が高くまで上昇した際にはあらゆる方向に火砕流が流下する危険性がある。これらのことは、阿蘇火山における今後の火山防災対策を立てる上で、十分検討すべき問題であろう。

7. ま と め

本論では、阿蘇火山中岳起源の火砕流である泉川火砕

流堆積物について分布や特徴を報告するとともに、その堆積物の層序的意義について考察した。その結果は以下のようにまとめられる。

泉川火砕流堆積物 (IzPF) は、中岳北東麓の標高 560~780 m 付近に扇状地状に分布しており、平均層厚は 5 m と考えられ、見かけ体積は $4.4\sim 9.4\times 10^6\text{ m}^3$ 程度である。この堆積物は色調や構成物質の違いから、黒色の下部ユニットと赤灰色の上部ユニットに分けられる。両ユニットともに、カリフラワー状火山弾と垂角礫~亜円礫状の緻密な岩片を含むことが特徴である。その火山弾と岩片は、 $\text{SiO}_2=49.6\sim 51.4\text{ wt.}\%$ と玄武岩組成であり、鏡下での観察でも斑晶の大きさや組合せ (単斜輝石>かんらん石>斜方輝石) が一致することから、どちらも本質物質と考えられる。

堆積物中に含まれる炭化木片の ^{14}C 年代 ($16,310\pm 90\sim 15,930\pm 220\text{ yrs BP}$) から、泉川火砕流の噴出年代は 19 cal ka 頃と推定された。これは中岳が降下スコリア・火山灰を大量に噴出し、古期山体の溶岩を流出した時期 (22~21 cal ka) と降下スコリアをもたらす爆発的な噴火が間欠的に発生した時期 (18~16 cal ka) とのちょうど中間にあたる。また、泉川火砕流堆積物の上位には、同質の火砕流堆積物 (小堀牧火砕流) や玄武岩質の溶岩 (尻無川溶岩) が発見されるなど、カルデラ外のテフラ層序からは認識できなかった激しい噴火活動が、中岳で 19 cal ka 頃に複数回発生していることが判明した。

泉川火砕流堆積物の存在によって、かつて中岳で発生した 10^6 m^3 オーダーの火砕流が、地形的低所を流れ下り、4 km 以遠の山麓にまで達していたことが明らかとなり、このことは今後の火山防災対策を立案する上で考慮すべき問題である。

謝 辞

熊本県文化課の馬場正弘氏には阿蘇火山テフラや溶岩流についてご教示いただくとともに、現地においても熱心に議論していただいた。蛍光 X 線分析を行う際には、農業・食品産業技術総合研究機構九州沖縄農業研究センターの久保寺秀夫氏にお世話になった。 ^{14}C 年代測定では、株式会社地球科学研究所の松山澄久氏と Beta Analytic 社の Darden Hood 氏に便宜をはかっていただいた。査読者である木村純一氏と下司信夫氏および編集担当の津久井雅志氏の意見により本論の内容は大いに改善された。以上の方々には心から感謝いたします。

引用文献

Alvarado, G.E. and Soto, G.J. (2002) Pyroclastic flow generated by crater-wall collapse and outpouring of the

lava pool of Arenal Volcano, Costa Rica. *Bull. Volcanol.*, **63**, 557-568.

阿蘇火山防災会議協議会 (1995) 阿蘇火山噴火災害危険区域予測図。

馬場正弘 (1999) 阿蘇南郷谷に伏在する溶岩流。熊本地学会誌, **120**, 2-8.

Cole, P.D., Fernandez, E., Duarte, E. and Duncan, A.M. (2005) Explosive activity and generation mechanisms of pyroclastic flows at Arenal volcano, Costa Rica between 1987 and 2001. *Bull. Volcanol.*, **67**, 695-716.

Fisher, R.V. and Schminke, H.U. (1984) *Pyroclastic Rocks*. Springer-Verlag, Berlin, 471 p.

Fujii, T. and Nakada, S. (1999) The 15 September 1991 pyroclastic flows at Unzen volcano (Japan): a flow model for associated ash-cloud surges. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 159-172.

福岡管区气象台 (1990) 阿蘇山. 九州地方の火山, 福岡管区气象台要報, **45**, 1-46.

Heiken, G. and Wohletz, K. (1985) *Volcanic Ash*. University of California Press, Berkeley, 246 p.

気象庁 (1996) 日本活火山総覧 (第 2 版). 500 p.

Macdonald, G.A. (1972) *Volcanoes*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 510 p.

町田 洋・新井房夫 (1976) 広域に分布する火山灰一始良 Tn 火山灰の発見とその意義. 科学, **46**, 339-347.

町田 洋・新井房夫 (1992) 火山灰アトラスー日本列島とその周辺. 東京大学出版会, 276 p.

宮縁育夫・渡辺一徳 (1997) 埋没黒ボク土層の ^{14}C 年代からみた完新世阿蘇火山テフラの噴出年代. 火山, **42**, 403-408.

宮縁育夫・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.

宮縁育夫・星住英夫・渡辺一徳 (2004) 阿蘇火山における更新世末期, AT 火山灰以降のテフラ層序. 火山, **49**, 51-64.

Miyabuchi, Y., Watanabe, K. and Egawa, Y. (2006) Bomb-rich basaltic pyroclastic flow deposit from Nakadake, Aso Volcano, southwestern Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **155**, 90-103.

Nakada, S., Shimizu, H. and Ohta, K. (1999) Overview of the 1990-1995 eruption of Unzen volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 1-22.

奥野 充 (2002) 南九州に分布する最近約 3 万年間のテフラの年代学的研究. 第四紀研究, **41**, 225-236.

小野晃司・渡辺一徳 (1985) 阿蘇火山地質図 (5 万分の 1). 火山地質図 4, 地質調査所.

小野晃司・下川浩一・曾屋龍典・渡辺一徳 (1982) 火山噴出物の地質学的・岩石学的研究. 昭和 54 年度特別研究促進調整費「1979 年の御岳山・阿蘇山噴火に関する特別研究」報告書, 科学技術庁研究調整局, 167-189.

小野晃司・渡辺一徳・星住英夫・高田英樹・池辺伸一郎 (1995) 阿蘇火山中岳の灰噴火とその噴出物. 火山, **40**, 133-151.

Ono, K., Watanabe, K., Hoshizumi, H. and Ikebe, S. (1995) Ash eruption of the Naka-dake crater, Aso volcano, southwestern Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **66**,

- 137-148.
- Stuiver, M., Reimer, P. J., Bard, E., Beck, J.W., Burr, G.S., Hughen, K.A., Kromer, B., McCormac, G., van der Plicht, J. and Spurk, M. (1998) INTCAL 98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, **40**, 1041-1083.
- Talma, A.S. and Vogel, J.C. (1993) A simplified approach to calibration ^{14}C dates. *Radiocarbon*, **35**, 317-322.
- 種子田定勝・松本征夫・宮地貞憲・宮地六美・石橋澄・児島正憲 (1959) 阿蘇火山 1958 年 6 月 “大爆発” 概報. *火山*, **3**, 136-146.
- 渡辺一徳 (1991) 阿蘇火山中岳の火山活動. 熊本地学会誌, **98**, 2-13.
- 渡辺一徳 (1992) 阿蘇火山. 日本地質学会第 99 年学術大会見学旅行案内書, 13-32.
- 渡辺一徳 (1993) 阿蘇火山中岳のハザードマップ. 文部省科学研究費自然災害特別研究・計画研究「火山災害の規模と特性」(代表者 荒牧重雄) 報告書, 297-312.
- 渡辺一徳・宮縁育夫 (1996) 熊本県阿蘇青年の家付近の阿蘇中央火口丘テフラ. 第四紀露頭集—日本のテフラ, 第四紀学会, 302.
- Yoshida, M. (1987) Preheating method for the determination of total phosphorus content in Andosols. *Soil Science and Plant Nutrition*, **33**, 501-505.
- (編集担当 津久井雅志)