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

Geology and petrology of the pre-Aso volcanic rocks distributed in the NW wall of Aso Caldera: eruption style and magma plumbing system of the pre-caldera volcanism

Abstract

古川邦之^{*1} 三好雅也^{*2}
新村太郎^{*3} 柴田知之^{*4}
荒川洋二^{*5}

*Kuniyuki Furukawa^{*1},
Masaya Miyoshi^{*2}, Taro Shinmura^{*3},
Tomoyuki Shibata^{*4} and Yoji Arakawa^{*5}*

2008年5月17日受付.
2009年1月20日受理.

^{*1} 愛知大学経営学部

Faculty of Business Administration, Aichi University, Miyoshi-cho, Nishikamo-gun, Aichi 470-0296, Japan

^{*2} 熊本大学大学院自然科学研究科

Graduate school of Science and Technology, Kumamoto University, Kurokami 2-39-1, Kumamoto 860-8555, Japan

^{*3} 熊本学園大学経済学部

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

^{*4} 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設

Institute of Geothermal Sciences, Kyoto University, Noguchibaru, Beppu 987-0903, Japan

^{*5} 筑波大学大学院生命環境科学研究科

Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba 305-8572, Japan

Corresponding author; K. Furukawa,
kffuru@aichi-u.ac.jp

Volcanic activity in the Aso area of central Kyushu, SW Japan, is divided into three stages based on caldera formation: a pre-caldera stage, a caldera-forming stage, and a post-caldera stage. We established the stratigraphy, and analyzed the whole-rock Sr and Nd isotopic compositions of volcanic products distributed in the NW wall of Aso Caldera to investigate the eruption style and magma-plumbing system of pre-caldera volcanism. Multiple andesitic lavas with minor dacitic lava make up a large part of the caldera wall. This eruption style of pre-caldera volcanism is different from that of the caldera-forming stage, which is characterized by gigantic pyroclastic eruptions. The cause of this transition in eruption style from the pre-caldera to caldera-forming stages is probably a decrease in the rate of extensional crustal strain in the area. The whole-rock isotopic compositions of the pre-caldera volcanic products are largely similar to those of the caldera-forming volcanic products, indicating that the magmas of these volcanic products had a common origin. Previous petrological studies have suggested that the silicic magma of the caldera-forming stage originated from crustal melting; consequently, it is also considered that the magma of the Pre-caldera stage formed via this process. The pre-caldera volcanic products show a wide range of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ values (0.7042–0.7045), whereas the products of the caldera-forming stage show a lower and narrower range of values (0.7040–0.7042). This observation indicates isotopic heterogeneity of the crust and differences in the composition of the crust that melted during the pre-caldera and caldera-forming stages.

Keywords: Aso, caldera, pre-Aso volcanic rock, pre-caldera volcanism, isotope, andesite

はじめに

カルデラ形成を伴うような珪長質マグマの大規模火砕噴火は（以降カルデラ噴火と呼ぶ）、地球上における地学現象の中で最もカタストロフィックな現象のひとつであり、これまで様々な観点から研究が進められてきた。それによりカルデラ火山における噴火活動やマグマ供給系の長期的進化プロセスが理解されつつあり、簡潔的には以下のようにまとめることができる。カルデラ噴火前には化学的に成層する巨大珪長質マグマ溜まりが形成され（例えば, Hildreth, 1979; Milner et al., 2003）、何らかの引き金により火砕流を主体とするカルデラ噴火が始まる（例えば, 小野ほか, 1977; Aramaki and

Ui, 1966）。それに伴い形成されるカルデラの陥没構造は、マグマ溜まりの形態や深さにより多様化すると考えられている（例えば, Lipman, 1997; 三浦・和田, 2007）。また多くのカルデラ火山における火山活動は、カルデラ噴火のみによって終わることはなく、その後も継続する。例えばカルデラ噴火直後には、新しい火成活動によりカルデラ床の隆起（リサージメント）が起きる可能性が示唆されている（例えば, Smith and Bailey, 1968 など）。また新しい火山活動により、Yellowstone や Crater Lake のようにカルデラ内部に中央火口丘が形成される場合もある（例えば, Bacon, 1983; Hildreth, 2004）。

このようにカルデラ噴火以降の噴火活動やマグマ供給系の

Fig. 1. Simplified geological map of Aso volcano adapted from Ono and Watanabe (1985).

進化に関する理解が進む一方、カルデラ噴火に至るまでの火山活動（先カルデラ火山活動）に注目すると、大規模マグマ溜まりが形成されるプロセスや、噴火活動の変遷についてはほとんど理解されていない。この問題に答える唯一の鍵となるのは先カルデラ火山活動の噴出物である。つまりカルデラ噴火に至る火山活動の過程を記録しているのは、それ以前の噴出物である。しかしそれらは、その後のカルデラ噴火噴出物による被覆や削剥を受けるため、元の地形を留めていないことが多い。また多くのカルデラ火山では、カルデラ内部に湖が存在するため、カルデラ壁に分布する先カルデラ火山活動噴出物の調査は困難である。このような理由により、先カルデラ火山活動に関する研究事例は欠如していると言える。

阿蘇火山では、約 27 万年前から約 9 万年前までに繰り返されたカルデラ噴火によって南北約 25 km、東西約 18 km の巨大なカルデラが形成され (Matumoto, 1943; 渡辺, 2001), その地形は現在まで保存されている。そしてそのカルデラ壁のほぼ全体には、先カルデラ火山活動の噴出物が良く露出しており (Fig. 1), また現在はカルデラ内を満たす湖は存在していない。そのため阿蘇火山は先カルデラ火山活動噴出物の地質調査に適している。また特にカルデラ北西壁には、阿蘇火山における先カルデラ火山活動の中でも噴出年代が比較的新しい噴出物が多く分布する (NEDO, 1991)。つまり、カルデラ北西壁の先カルデラ火山活動噴出物は、カルデラ噴火直前の噴火様式やマグマ溜まり形成プロセスを記録していることが期待されるため、カルデラ噴火への移行段階を理解するには重要な地域であると言える。そこで本稿では、カルデラ

北西壁における先カルデラ火山活動噴出物の地質学・岩石学的研究から、噴火様式やマグマ供給系の特徴を明らかにし、カルデラ形成期以降の噴出物との比較を行う。

阿 蘇 火 山

阿蘇火山は、4 回のカルデラ噴火により形成された南北約 25 km、東西約 18 km の巨大なカルデラで特徴づけられる (Matumoto, 1943; 渡辺, 2001)。先カルデラ火山活動の噴出物は、カルデラ噴火以降の噴出物と地質・岩石学的特徴が異なるため、阿蘇火山の噴出物とは分けて、先阿蘇火山岩類と呼ばれている (小野, 1965; 小野・渡辺, 1983)。本研究では阿蘇地域における長期的な火山活動に着目するため、その活動をカルデラ形成という観点から 3 ステージに分類した。それらは古い順に、カルデラ噴火以前の活動である先カルデラ火山活動期、カルデラ噴火を繰り返すカルデラ形成期、カルデラ噴火以降の後カルデラ火山活動期である。

カルデラ形成期には火砕流を中心とする 4 回のカルデラ噴火が繰り返され、それらは古い順に、Aso-1 (266 ± 14 ka), Aso-2 (141 ± 5 ka), Aso-3 (123 ± 6 ka), Aso-4 (89 ± 7 ka) と称されている (小野ほか, 1977; K-Ar 年代は松本ほか, 1991)。各々の噴火は、大局的に珪長質マグマから苦鉄質マグマによる活動へ遷移しているため、化学的に成層したマグマ溜まりからの噴火であると考えられている (金子ほか, 2006)。そしてこれらの噴火活動の間には相対的に小規模な多数の噴火サイクルがあり (小野ほか, 1977; 星住, 1990), それらの噴出物の組成範囲は Aso-1 から Aso-4 のカルデラ噴火噴出物のもと類似している (Furukawa, 2006; 古川ほか, 2006)。

Aso-4 以降の後カルデラ火山活動は、カルデラ内において現在も継続しており、玄武岩から流紋岩まで幅広い組成 (三好ほか, 2005) の複数の火山からなる中央火口丘群を形成している (小野・渡辺, 1985)。その活動史については、阿蘇カルデラの東方に厚く堆積したテフラから詳細に研究されている (宮縁ほか, 2003)。現在では中岳火山のみが活動している (Ono et al., 1995)。

先阿蘇火山岩類

先阿蘇火山岩類は、約 600 万年前から約 35 万年前の活動年代が報告されているが、その活動のほとんどは約 80 万年前から約 35 万年前の間に起きている (NEDO, 1991)。報告されている最も新しい先阿蘇火山岩類の K-Ar 年代は 360 ± 50 ka (NEDO, 1991) である。この年代と最初のカルデラ噴火である Aso-1 との間には年代測定の誤差を考慮すると 3–15 万年の時間間隙が存在する。

先阿蘇火山岩類は玄武岩から流紋岩まで幅広い組成を持つ。その層厚は、最も厚くて 600 m 以上にも達する (小野, 1965; 小野・渡辺, 1985)。これらの活動の特徴は、カルデラ壁の場所によって異なる。小野・渡辺 (1985) によると、(1) カルデラ北西壁: カルデラ北壁にはデイサイトの火砕岩が分布し、そこから西壁にかけては安山岩溶岩が分布する。(2) カルデラ南西壁: カルデラ南西壁は、主に角礫岩からな

る安山岩質火砕岩で特徴づけられる。またカルデラ南西壁と南東壁には複数の岩脈が貫入している（渡辺ほか, 1989）。(3) カルデラ南東: カルデラ南東壁には玄武岩の火砕岩が広く分布する。玄武岩組成の先阿蘇火山岩類はカルデラ南東壁から南壁にのみ分布している。(4) カルデラ北東壁: カルデラ東壁には、先阿蘇火山岩類で唯一の流紋岩組成である坂梨流紋岩溶岩が分布し、北壁にかけて妻子ヶ鼻をはじめとする複数の安山岩溶岩が分布する。これらの活動は、その後のカルデラ噴火のように、マグマが激しく破碎される噴火様式とは大きく異なる。

また先阿蘇火山岩類は、カルデラ形成期以降の噴出物と比べて、 SiO_2 量の増加に対する K_2O の増加量が乏しいという岩石学的特徴がある（小野・渡辺, 1983）。

カルデラ北西壁の地質

本研究では、カルデラ北壁の大観峰から西壁の立野地域までを調査地域とした。これらのうち詳細な調査を行った6地域（Fig. 2）について報告する。先阿蘇火山岩類の露出は断片的であり噴出物の境界部を確認することができないため、それらの詳細な層序関係を明らかにすることは困難であった。しかし本地域の噴出物は後述するように、柱状節理や板状節理に大きな傾斜が見られないため、ほぼ水平に定置したと考えられる。そのため、標高が層序関係を示すと見なし、噴出物が分布する標高を基に柱状図を作成した（Fig. 3）。

1. 大観峰（試料名: Daikanbo）

カルデラ北壁に位置する本地域は、内牧温泉とカルデラ壁上面に当たる大観峰を結ぶルートである。この地域では下位に角閃石デイサイト火砕岩、上位に輝石安山岩溶岩が分布する（小野・渡辺, 1985）。各々の K-Ar 年代は 570 ± 40 ka

と 480 ± 40 ka である（NEDO, 1991）。小野・渡辺（1985）によると、カルデラ北西壁におけるデイサイト組成の噴出物

Fig. 2. Topographic map showing six study areas. (1) Daikanbo (2) Kabutoiwa (3) Kario (4) Matoishi (5) Akase (6) Tateno. The map is adapted from 1/50000 scale map sheets of “Kikuchi”, “Asosan”, “Miyanoharu” published by Geographical Survey Institute.

Fig. 3. Sections of the pre-Aso volcanic rocks distributed in NW wall of Aso caldera. Sample names are attached in the sections. 2px: two pyroxene, Ol: olivine, Hb: hornblende.

は本地域に限られるが、本研究ではその露出は認められなかった。

上位の輝石安山岩溶岩は、標高 800 m 付近において確認することができた。それは 20–30° の東傾斜を示す厚さ 20 cm 以内の板状節理がよく発達する非常に堅牢な溶岩である。含まれる斑晶は斜長石 (1–2 mm)、単斜輝石 (1–1.5 mm)、斜方輝石 (1–1.5 mm)、鉄チタン酸化鉱物 (0.2–0.5 mm) である。石基はハイアロオフィティック組織を呈する。

2. 兜岩 (試料名: BCPA-54)

カルデラ北西壁に位置する本地域は、内牧温泉西とカルデラ壁上面を結ぶルートである。この地域では下位に輝石安山岩溶岩、上位に角閃石安山岩溶岩が分布する (小野・渡辺, 1985)。本地域では、輝石安山岩溶岩の露出は認められなかった。また上位の角閃石安山岩には、両輝石が含まれるため、角閃石両輝石安山岩とした。角閃石両輝石安山岩溶岩の K–Ar 年代は 380 ± 20 ka である (NEDO, 1991)。

角閃石両輝石安山岩溶岩は、標高約 770–950 m の範囲の急崖に露出している。その岩相は、灰白色で塊状であり、層準によっては約 20° の北傾斜を示す厚さ約 10 cm の板状節理がよく発達している。やや脱ガラス化が進行しており、非常に堅牢である。含まれる斑晶は、斜長石 (0.1–2 mm)、単斜輝石 (0.2–0.5 mm)、斜方輝石 (0.8 mm 程度)、角閃石 (0.2–2 mm)、鉄チタン酸化鉱物 (0.1–0.2 mm) である。角閃石は様々な程度にオパサイト化している。鏡下において完全に不透明となっている場合もある。斜方輝石のほとんどは融食されており、丸みを帯びている。石基はハイアロオフィティック組織を呈する。

3. 狩尾牧場南 (試料名: BCPA-40, 41, 42, 43)

兜岩の南に位置する本地域は、狩尾とカルデラ上面に当たる狩尾牧場を結ぶルートであり、小野・渡辺 (1985) では輝石安山岩溶岩が分布する地域である。本地域での先阿蘇火山岩類は、標高約 710–840 m の範囲で断続的に露出する。K–Ar 年代は、標高約 780 m 地点の岩石から得られており、460 ± 40 ka である (NEDO, 1991)。

岩相は、全て灰白色、塊状であり、脱ガラス化が進行しているため堅牢である。一見すると全て類似した溶岩であるが、かんらん石斑晶の有無により分類することができる。即ち、標高 770 m 付近の溶岩 (BCPA-42) はかんらん石を含まないが、その上下の層準の溶岩はかんらん石を含む。また標高 720–730 m 地点 (BCPA-41) では、厚さ約 5 cm で約 15° の北傾斜を示す板状節理が発達し、赤色化している部分が観察できる。このような赤色化は、溶岩の表面において、冷却中に空気と接触し高温酸化することにより進行するので (Saito et al., 2007)、標高 720–730 m 地点の岩石は、溶岩の表面付近を構成していると考えられる。つまり本地域ではこれらの岩相変化、および後述する化学組成の変化から、少なくとも 3 枚の溶岩が分布していると考えられる。しかし、記載岩石学的な特徴は、斑晶にかんらん石を含むこと以外は類似している。含まれる斑晶は、斜長石 (0.2–2 mm)、単斜輝石 (0.3–1 mm)、斜方輝石 (0.1–0.8 mm)、角閃石 (1 mm 程度)、鉄チタン酸化鉱物 (0.1–0.5 mm)、BCPA-40、

41, 43 ではかんらん石 (0.2–0.5 mm) である。斜長石はまれに融食を受けており、内部に汚濁帯を持つ場合もある。角閃石のほとんどは自形で、大部分がオパサイト化している。石基はハイアロオフィティック組織を呈する。

4. 的石南西採石場 (試料名: KDPA-38)

本地域は、的石地域の南西に位置する採石場であり、噴出物の層厚は約 70 m である。この噴出物の K–Ar 年代は 360 ± 50 ka であり (NEDO, 1991)、先阿蘇火山岩類から得られている最も若い年代値を示す。

下位の約 30 m は塊状で垂直の柱状節理が発達するが、それより上位はクラストサポートの弱溶結火山角礫岩に遷移する。クラストは直径 5–10 cm 程度で単源 (monolithologic) である。また良く発泡しており円磨度が高い。塊状部は灰白色であるが、角礫部分は全体的に赤色酸化している。このような特徴から本噴出物は、溶岩とそのクリンカー、もしくは火口近傍で堆積したアグルチネートであると考えられる。本研究ではその遷移部を確認することは困難であるため、その起源を決定することはできなかった。この噴出物に含まれる斑晶は、斜長石 (0.2–2 mm)、単斜輝石 (0.3–2 mm)、斜方輝石 (0.5 mm 程度)、角閃石 (0.5–2 mm)、鉄チタン酸化鉱物 (0.1–0.5 mm) である。角閃石は狩尾牧場南地域と同じく、ほとんどが完全にオパサイト化している。石基はハイアロオフィティック組織を呈する。

5. 赤瀬西採石場 (試料名: TTPA-44, 44U)

本地域は、赤瀬地域の西に位置する採石場である。噴出物の総層厚は約 130 m である。本噴出物からの放射年代は報告されていない。

下位の約 20 m には、塊状で一部に約 10° の東傾斜を示す厚さ約 10 cm の板状節理が発達する溶岩が確認できる (TTPA-44)。その上位には、厚さ 100 m を超す溶岩が確認できる (TTPA-44U)。その内部は垂直の柱状節理が発達しており、一部には褶曲した板状節理で特徴づけられる流理構造が認められる。両者の間で、記載岩石学的な特徴がやや異なる。下位の噴出物に含まれる斑晶は、斜長石 (0.1–2.5 mm)、単斜輝石 (0.2–0.5 mm)、斜方輝石 (0.5 mm 程度)、角閃石 (0.1–0.5 mm)、鉄チタン酸化鉱物 (0.1–0.3 mm) である。角閃石は狩尾牧場南地域と同じく、ほとんどが完全にオパサイト化しているが、内部には新鮮な角閃石が保存されている場合もある。結晶は弱い定向性を示す。石基はハイアロオフィティック組織を呈する。一方、上位の噴出物に含まれる斑晶は、斜長石 (0.1–2 mm)、単斜輝石 (0.5–2.5 mm)、斜方輝石 (0.5 mm 程度)、鉄チタン酸化鉱物 (0.1–0.5 mm) である。石基はハイアロオフィティック組織を呈する。

6. 立野 (試料名: TTPA-33, 45, 46, 47, 48)

カルデラ西壁の立野火口瀬北側に位置する本地域は、立野地域からカルデラ上面を結ぶルートである。本地域での先阿蘇火山岩類は、標高約 360–500 m の範囲に断続的に露出する。放射年代は報告されていない。本地域の標高 360, 450, 490, 500 m 付近にはそれぞれ岩相の異なる 4 枚の溶岩が分布している。

Fig. 4. Major elements (TiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Na_2O , Fe_2O_3^* , K_2O and MgO wt.%) vs. SiO_2 (wt.%) diagrams of the whole-rock composition of the pre-Aso volcanic rocks distributed in the NW wall of Aso caldera. Total Fe as Fe_2O_3^* .

Fig. 5. Trace elements (Rb, Ba, Sr, Nb, Zr and Y ppm) vs. SiO_2 (wt.%) diagrams of the whole-rock composition of the pre-Aso volcanic rocks distributed in the NW wall of Aso caldera.

最下位の標高 360 m 付近には、塊状ガラス質の非常に堅牢な溶岩が分布する (TTPA-33)。この噴出物は全体的に暗灰色を呈しているが、局所的に脱ガラス化を受けて灰白色を呈している。また厚さ約 5 cm の板状節理が水平方向に発達することもある。含まれる斑晶は、斜長石 (0.5–2.5 mm)、単斜輝石 (0.3–2 mm)、斜方輝石 (0.3–1.5 mm)、鉄チタン酸化鈹物 (0.2–0.5 mm) である。石基はハイアロオフィティック組織を呈し、ガラス質石基に特徴的な不規則な割れ目が発達する。

標高 450 m 付近には、塊状で垂直の柱状節理が発達する、灰白色を呈する溶岩が露出する (TTPA-45, 46)。含まれる斑晶は、斜長石 (0.1–2.5 mm)、単斜輝石 (0.5 mm 程度)、斜方輝石 (0.5–2.5 mm)、かんらん石 (0.5 mm 程度)、鉄チタ

ン酸化鈹物 (0.1–0.5 mm) である。石基はハイアロオフィティック組織を呈する。

標高 490 m 付近には、垂直の柱状節理および約 15° の北傾斜を示す板状節理が発達する塊状の溶岩が分布する (TTPA-47)。ややガラス質であるため暗灰色を呈するが、局所的に酸化して赤色を呈している。含まれる斑晶は、斜長石 (0.5–2 mm)、単斜輝石 (<0.5 mm)、斜方輝石 (0.2–0.5 mm)、鉄チタン酸化鈹物 (0.2–0.5 mm) である。斜長石は強い定向性を示す。石基はハイアロオフィティック組織を呈する。

標高 500 m 付近には、厚さ数 cm の薄い板状節理が水平に発達する溶岩が分布する (TTPA-48)。脱ガラス化が進行しており、灰白色を呈している。露出は狭い範囲に限られて

Table 1. Strontium and Neodymium isotope ratios with 2σ mean errors.

Area	Sample	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ mean error	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	2σ mean error
(1)Daikanbo	Daikanbo	0.704433	0.000010	0.5127204	0.0000082
(2)Kabutoiwa	BCPA-54	0.704163	0.000011	0.5127661	0.0000060
(3)Kario	BCPA-43	0.704389	0.000012	0.5126930	0.0000071
(4)Matoishi	KDPA-38	0.704205	0.000011	0.5127815	0.0000084
(5)Akase	TTPA-44	0.704462	0.000009	0.5126997	0.0000073
(6)Tateno	TTPA-33	0.704319	0.000011	0.5127550	0.0000060
	TTPA-45	0.704237	0.000009	0.5127424	0.0000071
	TTPA-46	0.704233	0.000011	0.5127530	0.0000090
	TTPA-47	0.704354	0.000013	0.5127382	0.0000075
	TTPA-48	0.704359	0.000011	0.5127264	0.0000061

Fig. 6. Sr and Nd isotope ratios ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) of the study areas. Error bars show 2σ mean errors.

いるため、詳細を把握することは困難である。含まれる斑晶は、斜長石 (0.5–3 mm)、単斜輝石 (<0.5 mm)、斜方輝石 (0.5 mm 程度)、鉄チタン酸化鉱物 (0.1–0.5 mm) である。石基はハイアロオフィティック組織を呈する。

全岩化学組成と同位体分析

本調査地域に分布する、先阿蘇火山岩類の各試料採取地点 (Fig. 3) から、各 1 試料 (TTPA-33 のみ 2 試料)、計 15 試料の全岩化学分析により主成分元素量および微量元素量を求めた。分析手法および分析値は三好ほか (本特集号) と同じである。各地域における主成分元素、微量元素のハーカー図をそれぞれ Fig. 4, Fig. 5 に示す。また本調査地域の全 10 試料について、全岩の Sr および Nd 同位体比を求めた。Sr 同位体比 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) の分析には京都大学地球熱学研究施設の表面電離型質量分析装置 (Finnigan 社製 MAT262) を使用した。試料の処理および分析方法の詳細は Shibata et al. (2007) にしたがった。試料と同時に測定した標準試料 NIST987 の $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 値は 0.710260 ± 0.000030 (2σ , $n=20$) であった。Nd 同位体比 ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) の分析には筑波大学の

表面電離型質量分析装置 (Finnigan 社製 MAT262) を使用した。試料の処理および分析方法の詳細は Arakawa (1992) にしたがった。試料と同時に測定した標準試料 JNDi-1 の $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 値は 0.512110 ± 0.000019 (2σ , $n=13$) であった。これらの分析値を Table. 1, Fig. 6 および Fig. 7 に示す。

全岩化学分析により求められた噴出物の SiO_2 量は約 57–66 wt.% の範囲にある。立野地域の最下位に位置する TTPA-33 のみがデイサイト組成で、その他は全て安山岩組成である。また巽 (1995) による K_2O 含有量を用いた分類において、本地域の噴出物の大部分は中カリウム系列と高カリウム系列の境界付近にプロットされる。一方で、TTPA-33 は高い K_2O 量を示し、高カリウム系列とシヨシナイト系列の境界付近にプロットされる。主成分元素については、 SiO_2 量の増加に伴い、TTPA-33 を除き、 TiO_2 、 CaO 、 Fe_2O_3^* 、 MgO 量は概ね直線的に減少し、 Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 量は概ね直線的に増加する (Fig. 4)。微量元素については SiO_2 量の増加に伴い、Sr 量は減少し、Rb、Ba、Nb、Zr、Y 量は増加する (Fig. 5)。

カルデラ北西壁の先阿蘇火山岩類をカルデラ形成期の噴出

Fig. 7. Isotope ratios of Sr and Nd of pre-Aso volcanic rocks in the study areas. A magnified image of the distribution are shown at the upper right part. Error bars show 2 σ mean errors. DMM: depleted MORB source mantle, HIMU: high- μ ($\mu = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$), EM1: enriched mantle I, EM2: enriched mantle II.

Fig. 8. Major elements (CaO, Al_2O_3 and MgO wt.%) vs. SiO_2 (wt.%) diagrams of the whole-rock composition of the ejecta of the pre-caldera stage (this study), the caldera-forming stage (Hunter, 1998), and the post-caldera stage (Miyoshi et al., 2005).

Fig. 9. Incompatible elements (K_2O wt.% and Rb ppm) vs. SiO_2 (wt.%) diagrams of the whole-rock composition of the ejecta of the pre-caldera stage (this study), the caldera-forming stage (Hunter, 1998), and the post-caldera stage (Miyoshi et al., 2005).

Fig. 10. K_2O (wt.%) vs. Ba (ppm), Rb (ppm) vs. Ba, and K_2O vs. Rb diagrams of the whole-rock composition of the ejecta of the pre-caldera stage (this study), the caldera-forming stage (Hunter, 1998), and the post-caldera stage (Miyoshi et al., 2005).

物 (Hunter, 1998) および後カルデラ火山活動期の噴出物 (三好ほか, 2005) と比較すると, MgO , CaO 量にやや富み, 液相濃集元素量に乏しいという違いはあるが, 大局的にはそれらと類似した組成範囲に入る (Fig. 8, 9). 特に K_2O , Ba, Rb 量などの液相濃集元素同士の関係を見ると, 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の各時期の噴出物が同一のトレンドを形成し, 類似性は極めて高いことがわかる (Fig. 10).

Sr 同位体比と Nd 同位体比はそれぞれ, 0.7042 から 0.7045, 0.5127 から 0.5128 までの値を示す (Fig. 6). Sr 同

Fig. 11. Temporal change of Sr isotope ratio ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) from the pre-caldera stage to the caldera-forming stage.

位体比においては, TTPA-45 と TTPA-46 および TTPA-47 と TTPA-48 の分析値はそれぞれ測定誤差の範囲内で一致するが, その他の試料は明確に異なる値を示す. Nd 同位体比においては, 立野地域の試料はそのほとんどが誤差範囲内で一致する. Sr 比-Nd 比プロットにおいて先阿蘇火山岩類の値は, DMM (depleted MORB source mantle) と EM1 (enriched mantle I) を結ぶ線上付近でそれに平行に分布している (Fig. 7). これらは東北日本や西南日本の第四紀火山岩の分布範囲に含まれる. またいくつかの噴出物の年代値は得られていないが, 同位体比の時間変化や SiO_2 量との明瞭な相関は見られない. これらの分析値は, 本調査地域以外の先阿蘇火山岩類の分析値範囲 (新村・荒川, 2007) とよく一致しており, カルデラ形成期の噴出物の Sr 同位体比 (Hunter, 1998) と比べると, その値はやや高く範囲が広い (Fig. 11).

考 察

1. カルデラ噴火に至る火山活動

本研究および小野・渡辺 (1985) により, カルデラ北西壁におけるカルデラ噴火以前の噴火活動の概要が明らかになった. それらによるとこの地域では, 大規模な火砕噴火で特徴づけられるカルデラ形成期に比べて, より小規模な溶岩噴出を主体とする活動が継続していたと考えられる. つまりカルデラ北西壁周辺の前カルデラ火山活動は, カルデラ噴火に向けて, 徐々に爆発的な活動に移行するのではなく, 比較的穏やかな噴火活動が継続していたと考えられる. このように, カルデラ噴火に至る先カルデラ火山活動において, 比較的小規模な溶岩が継続して噴出することは Borrowdale Volcanic

Group (Petterson et al., 1992) や Yellowstone (Bindeman and Valley, 2001) においても報告されている.

上記のように, 阿蘇火山における先カルデラ火山活動期とカルデラ形成期では, 噴出量および噴火様式に大きな違いがある. 噴出量の違いは, 地殻歪速度によって支配されていることが指摘されている. 即ち, 地殻歪速度が小さく静穏な地殻環境では, マグマが大量に蓄積されやすく, カルデラ噴火が起きやすい. 逆に地殻歪速度が大きい場合において, 引張応力場では独立単成火山群が, 圧縮応力場では複成火山体が形成される傾向がある (高橋, 1995). また噴火様式に関して, 引張応力場ではマグマの上昇が容易になり, 溶岩による活動が卓越すると考えられている (Petterson et al., 1992).

中部九州では, 約 6 Ma から始まったフィリピン海プレートの沈み込みにより, 大分-熊本構造線が右横ずれ運動を行い, 引張的な応力場となった. それにより豊肥火山地域と呼ばれる大規模な火山性陥没地溝が形成された (Kamata, 1989b). 阿蘇火山は豊肥火山地域の南端に位置している. 豊肥火山地域の拡大速度は, 5-4 Ma が 2.1 mm/年, 4-3 Ma が 1.63 mm/年, 3-2 Ma が 1.26 mm/年, 2-1 Ma が 0.84 mm/年, 1-0 Ma が 0.51 mm/年であり, 時間と共に減少する (Kamata, 1989b). またこの時期の噴火活動について, 5-2 Ma には大量の安山岩を中心とする溶岩が広域的に流出し台地地形を形成した (Kamata, 1989b). そして 1 Ma 以降になると, 耶馬溪火砕流 (Kamata, 1989a), 今市火砕流 (小野ほか, 1977), 由布川火砕流 (星住・鎌田, 1991), Aso-1-4 (小野ほか, 1977) などのカルデラ噴火が繰り返り起きた. 高橋 (1995) は, 1 Ma 以降の繰り返されるカルデラ噴火は, マグマの生産率上昇のためではなく, 地溝の拡大速度の減少により地殻中にマグマが蓄積されやすくなったことが原因であると解釈している. 豊肥火山地域に属する阿蘇火山も, 上記のような応力場の変遷を経験していると考えられる. そして 1 Ma 以降も地溝の拡大速度の減少が継続していたと仮定すると, 阿蘇火山のカルデラ北西壁付近では, 早ければ, 先カルデラ火山活動の最も新しい噴出年代である約 36 万年前を境に, 断続的な溶岩の小規模な噴火から, 地殻中におけるマグマの蓄積に転じたと考えられることができる. 最初のカルデラ噴火である Aso-1 の噴出年代と先カルデラ火山活動の最も新しい噴出年代の間には, 年代測定の誤差を考慮すると 3-15 万年の時間間隙が存在するが, それはマグマ蓄積の期間で, 地殻中のマグマは外に出ることができず, 地表における顕著な火山活動を休止していたのかもしれない.

2. 立野地域に分布するデイサイト (TTPA-33) について

先阿蘇火山岩類は, カルデラ形成期以降の噴出物に比べて, SiO_2 量の増加に対する K_2O の増加量に乏しいことは知られていたが (小野・渡辺, 1983), 三好ほか (本特集号) は, K_2O 量のみではなく, その他の液相濃集元素量についても同様に乏しいことを示した. そのような特徴は, SiO_2 量と, K_2O 量もしくは Rb 量の関係において特に顕著である. カルデラ北西壁に分布する先阿蘇火山岩類の液相濃集元素量も, そのほとんどがカルデラ形成期以降の噴出物に比べて乏しく, それらを明確に識別することができる (Fig. 9). しか

し、立野地域のデイサイト溶岩 TTPA-33 は、他の先阿蘇火山岩類に比べて液相濃集元素量に富み、カルデラ形成期以降の液相濃集元素量と一致する (Fig. 9)。このことは、TTPA-33 の起源について、以下の2つの可能性を示している。ひとつは、TTPA-33 はカルデラ壁に露出したカルデラ形成期以降の噴出物であること。もうひとつは、先阿蘇火山岩類であるが、カルデラ形成期以降の噴出物と同様に液相濃集元素量に富む特徴を有していることである。上記のように先阿蘇火山岩類とカルデラ形成期以降の噴出物は岩石学的特徴が明確に異なり、これまで後者のような特徴を有する先阿蘇火山岩類は報告されていない。つまり TTPA-33 が先阿蘇火山岩類であれば、カルデラ形成期以前に、既にカルデラ噴火を起こすマグマが準備されていたことを示唆する。これを決定することは、先カルデラ火山活動からカルデラ形成期に移行する段階のマグマ供給系を考察する上で重要である。

カルデラ形成期以降の噴出物は、マグマの起源物質となる地殻の水量やマグマの酸化還元状態の変化により、時間と共に SiO_2 量の増加に対する K_2O の増加量に乏しくなる傾向がある (金子ほか, 2006; Furukawa, 2006)。このような特徴は K_2O のみならず、他の液相濃集元素についても同様である。即ち、カルデラ形成期では Aso-1, Aso-2, Aso-3, Aso-4 の順に SiO_2 量の増加に対する液相濃集元素の増加量に乏しくなる (Hunter, 1998)。また後カルデラ火山活動期における液相濃集元素量は、Aso-3 もしくは Aso-4 の値と概ね一致する (Fig. 9)。TTPA-33 の液相濃集元素量は Aso-1 もしくは Aso-2 と一致している (Fig. 9)。詳細な岩石学的データは報告されていないが、Aso-1 と Aso-2 の間には複数の溶岩の活動が確認されている (小野・渡辺, 1985)。これらの溶岩の液相濃集元素量が Aso-1 と Aso-2 の中間の値もしくはどちらかと同様の値を示すならば、それらと対比される可能性もある。次に TTPA-33 は塊状溶岩であることから、火砕噴火が中心の Aso-1 および Aso-2 との対比は考えにくく、Aso-1 と Aso-2 の間の溶岩と対比される可能性がある。しかしカルデラ北西壁にそれらが露出する標高について、TTPA-33 は標高約 360 m であり、Aso-1 以降の噴出物は標高約 800 m より高所 (小野・渡辺, 1985) である。つまりそれらの分布層準は大きく異なる。さらに Sr 同位体比の点からも、TTPA-33 の値は 0.704319 ± 0.000011 であり、Aso-1, 2 間の溶岩では唯一 Sr 同位体比が報告されている阿蘇カルデラ西方にある赤井火山起源の砥川溶岩 (松本, 1974) の値 0.704124 ± 0.000010 (新村・荒川, 2007) よりも有意に高い。また Aso-1 および Aso-2 の Sr 同位体比で最も高い値である 0.704219 ± 0.000020 (Hunter, 1998) と比較しても TTPA-33 の方が有意に高い。これらのことから、TTPA-33 はカルデラ形成期以降の噴出物ではなく、それらと類似した液相濃集元素の特徴を持つ先阿蘇火山岩類である可能性が高い。ただし TTPA-33 の分布は狭い範囲に限られており、周囲の岩石との詳細な関係を把握することは困難である。そのため、カルデラ形成期以降の、同位体組成が報告されていない噴出物に関連した貫入岩を溶岩と誤認している可能性は否定できない。よって今後、TTPA-33 の正確な噴出年代を決定する必

要がある。

3. 先カルデラ火山活動期のマグマ供給系

カルデラ北西壁に分布する先阿蘇火山岩類の Sr 同位体比のほとんどは、測定誤差を超えて分離することができる (Fig. 6)。Sr 同位体比は、地殻の部分溶融度やマグマの結晶分化作用によって影響されず、その値が異なる地殻物質の同化作用やマグマ混合によって変化する。つまりカルデラ北西壁における先阿蘇火山岩類の全岩化学組成の多様性は結晶分化作用のみでは説明できず、Sr 同位体比の異なる物質が関与していたと考えられる。

カルデラ北西壁の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の全ての噴出物の全岩化学組成は大局的には類似している (Fig. 8)。特に K_2O , Ba, Rb 量などの液相濃集元素同士の関係を見ると、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の各時期の噴出物が同一のトレンドを形成し、極めて類似していることがわかる (Fig. 10)。このように火山活動の規模や時期に関わらず全岩化学組成が大局的に類似することから、これらのマグマの起源は同一であると考えられる。一方でより詳細な全岩化学組成の多様性に関しては、その後のマグマの分化や混合などの進化プロセスを反映していると考えられ、三好ほか (本特集号) で議論されている。

先カルデラ火山活動期から現在に至るまでの噴出物の全岩化学組成の大局的な一致は、それらのマグマの根本的な起源が変化していないことを示している。カルデラ形成期におけるマグマの起源に関しては、金子ほか (2006) および金子ほか (2008) において岩石学、理論、および実験にもとづいて議論されており、比較的苦鉄質な地殻物質の溶融によって形成されたと考えられている。このことから、カルデラ北西壁の先カルデラ火山活動期のマグマも同様に、始源的な苦鉄質マグマの結晶分化により形成されたのではなく、高温マグマを熱源とする地殻物質の溶融によって形成されたと考えられる。

次に Sr 同位体比について、カルデラ形成期の噴出物の Sr 同位体比は、変質の可能性が指摘されている試料を除き、0.7040 から 0.7042 であり (Hunter, 1998)、カルデラ北西壁の先阿蘇火山岩類では、0.7042 から 0.7045 である (Fig. 11)。先阿蘇火山岩類とカルデラ形成期以降の噴出物では、Sr 同位体比の特徴が2つの点で異なる。ひとつは、先阿蘇火山岩類における Sr 同位体比の範囲がカルデラ形成期の噴出物に比べて広いことである。もうひとつは、先阿蘇火山岩類の Sr 同位体比の方が全体的に高い値を示すことである。これらの特徴は、カルデラ北西壁のみではなく、他地域の先阿蘇火山岩類 (新村・荒川, 2007) についても同様である。

以上のことから、カルデラ北西壁の先阿蘇火山岩類のマグマは、カルデラ形成期と同様に、根本的には地殻物質の溶融により形成されたと考えることができる。しかしその一方で、Sr 同位体比の性質は異なる。その原因については今後、慎重に検討すべき課題である。しかしひとつの可能性として、全岩化学組成は類似するが、その形成年代が様々である地殻がマグマの起源物質として関与している可能性を指摘するこ

とが出来る。なぜなら Sr 同位体比は Rb の放射壊変により時間と共に高くなるので、一般に形成年代の古い地殻ほど高い Sr 同位体比を示すためである。上記のような地殻物質が関与しているとすれば、Sr 同位体比の多様化、および先カルデラ火山活動からカルデラ形成期への移行は以下のように説明することができる。

豊肥火山地域ではフィリピン海プレートの沈み込み以降、マントルからの苦鉄質マグマが継続的に上昇している (Nakada and Kamata, 1991)。先カルデラ火山活動期には、その高温な苦鉄質マグマが地殻浅部まで上昇し、それが熱源となって地殻の様々な場所で溶融が起き、複数の比較的小規模なマグマ溜まりが形成される。この時、上記のように溶融される地殻が、全岩化学組成はほぼ均質で形成年代が様々であったなら、Sr 同位体比が多様な複数のマグマが形成される。その後、地殻歪速度の減少によりマグマが地殻中に蓄積されやすくなり、かつ地殻中への苦鉄質マグマの注入が継続し地殻全体の温度が上昇すると、地殻の溶融が促進され、カルデラ噴火を起こす大規模マグマ溜まりが形成される。

つまり先カルデラ火山活動期の比較的小規模なマグマ溜まりは、地殻の様々な場所を溶融することにより形成されるため、局所的な同位体組成の情報を反映する。一方でカルデラ形成期の大規模なマグマ溜まりは、地殻を大規模に溶融するので、広範囲に渡る同位体組成を平均化した情報を反映しているのかもしれない。その結果、先カルデラ火山活動期の噴出物では Sr 同位体比が比較的多様である一方、カルデラ形成期の噴出物では収束していると考えられる。Sr 同位体比がカルデラ噴火に向けて収束する現象は、阿蘇火山のみではなく Long Valley においても観察されているため (Halliday et al., 1989)、新しいカルデラ像を構築する上で重要な情報を担っているのかもしれない。

また Sr 同位体比は、先阿蘇火山岩類の方がカルデラ形成期の噴出物に比べて高い値を示す。このことは、現在報告されている先阿蘇火山岩類のマグマのみを混合することにより、カルデラ形成期のマグマを生成することは不可能であることを意味している。本研究からはこの同位体比の違いの原因を特定することはできない。しかしこれらの噴出物の Sr 同位体比が起源物質である地殻の組成を反映しているのであれば、先カルデラ火山活動期とカルデラ形成期では溶融する地殻の年代が異なっていることを示し、それはつまり溶融する地殻の場所 (深度) が異なることを示しているのかもしれない。

ま と め

阿蘇火山におけるカルデラ北西壁に分布する先阿蘇火山岩類の地質学・岩石学的研究を行った。それにより、先カルデラ火山活動期の噴火活動およびマグマ供給系に関して、以下のような結論を得た。

- (1) カルデラ北西壁の 6 地域において柱状図を作成し、各斑晶組合せを持つ噴出物の分布を示した。
- (2) 大規模火砕噴火中心のカルデラ形成期とは異なり、本調査地域の先阿蘇火山岩類の火山活動は比較的小規模な溶

岩噴出が主体であったと考えられる。このような先カルデラ火山活動とカルデラ噴火の、噴火様式および噴出量の違いには、テクトニクスの要因がある可能性を示した。

- (3) 立野地域に分布するデイサイト溶岩 (TTPA-33) は、カルデラ形成期以降の噴出物と類似した液相濃集元素の特徴を示す。しかし噴火様式や分布域、Sr 同位体比から考えると、それは先阿蘇火山岩類のメンバーであると考えられる。
- (4) カルデラ北西壁における先阿蘇火山岩類の全岩化学組成は、カルデラ形成期以降の噴出物と比べて、大局的には主成分元素、微量元素共に類似している。このことから、それらのマグマの起源は類似していると考えられる。つまり先カルデラ火山活動期のマグマは、カルデラ形成期のマグマにおいて考察されているように、根本的には地殻物質の溶融により生成されたと考えられる。
- (5) 先阿蘇火山岩類の Sr 同位体比は、カルデラ形成期の噴出物と比較して全体的に高い値で、その範囲が広い。これは、それらのマグマが地殻溶融によって形成されているのであれば、先カルデラ火山活動期とカルデラ形成期で溶融する地殻が異なることを示す。さらに、先阿蘇火山岩類の Sr 同位体比の多様性は、地殻における同位体組成の不均質性を反映している可能性がある。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、熊本大学の渡辺一徳氏には露頭の情報を教えて頂いた。岩石薄片の作成では、京都大学の石川尚人氏、金子克哉氏、小豆畑逸郎氏にお世話になった。電力中央研究所の三浦大助氏には本特集号へ投稿する機会を頂いた。編集担当である産業技術総合研究所の古川竜太氏、および 2 名の匿名査読者の方からは有益なコメントを頂き本稿は改善された。本研究には 2006 年度東京大学地震研究所特定共同研 B (2003-B-01)、2007-2008 年度愛知大学研究助成 (C-148) および 2007 年度熊本学園大学学術研究助成からの予算を使用した。以上の方々には心から感謝を申し上げます。

文 献

- Arakawa, Y., 1992, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ ratios of twelve GSJ rock reference samples and reproducibility of the data. *Geochem Jour.* **26**, 105-109.
- Aramaki, S. and Ui, T., 1966, The Aira and Ata pyroclastic flows and related caldera and depressions in southern Kyushu, Japan. *Bull. Volcanol.*, **29**, 29-48.
- Bacon, C.R., 1983, Eruptive history of Mount Mazama and Crater Lake caldera, Cascade Range, USA. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **18**, 57-118.
- Bindeman, I.L. and Valley, J.W., 2001, Low- $\delta^{18}\text{O}$ rhyolites from Yellowstone: Magmatic evolution based on analyses of zircons and individual phenocrysts. *Jour. Petrol.*, **111**, 35-53.
- Furukawa, K., 2006, Geology and Petrology of Silicic Volcanism in Extensional Plate Convergent Zone. PhD Thesis, Kyoto University, Japan, 118p.
- 古川邦之・金子克哉・小屋口剛博・鎌田浩毅 (Furukawa, K., Kaneko, K., Koyaguchi, T. and Kamata, H.), 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 (*Chikyu*

- Monthly*), **28**, 386-391.
- Halliday, A.N., Mahood, G.A., Holden, P., Metz, J.M., Dempster, T.J. and Davidson, J.P., 1989, Evidence for long residence times of rhyolitic magma in the Long Valley magmatic system: the isotopic record in precaldra lavas of Glass Mountain. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **94**, 274-290.
- Hildreth, W., 1979, The Bishop Tuff: Evidence for the origin of compositional zonation in silicic magma chamber. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.*, **180**, 43-75.
- Hildreth, W., 2004, Volcanological perspectives on Long Valley, Mammoth Mountain, and Mono Craters: several contiguous but discrete systems. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **136**, 169-198.
- 星住英夫 (Hoshizumi, H.), 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. 地球惑星科学関連学会 1990 年合同大会 (*Japan Geoscience Union Meeting*), **92**, 92.
- 星住英夫・鎌田浩毅 (Hoshizumi, H. and Kamata, H.), 1991, 由布川火砕流の噴出年代. 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **36**, 393-401.
- Hunter, A.G., 1998, Intracrustal-controls on the coexistence of tholeiitic and calc-alkaline magma series at Aso Volcano, SW, Japan. *Jour. Petrol.*, **39**, 1255-1284.
- Kamata, H., 1989a, Shishimuta caldera, the buried source of the Yabakei pyroclastic flow in the Hohi volcanic zone, Japan. *Bull. Volcanol.*, **51**, 41-50.
- Kamata, H., 1989b, Volcanic and structural history of the Hohi volcanic zone, central Kyushu, Japan. *Bull. Volcanol.*, **51**, 315-332.
- 金子克哉・小屋口剛博・古川邦之 (Kaneko, K., Koyaguchi, T. and Furukawa, K.), 2006, 阿蘇火山におけるマグマ供給系の長期進化. 月刊地球 (*Chikyu Monthly*), **28**, 67-74.
- 金子克哉・小屋口剛博・高橋俊郎 (Kaneko, K., Koyaguchi, T. and Takahashi, T.), 2008, 阿蘇火山の大規模噴火における珪長質および苦鉄質マグマの生成に関する地球化学的制約. 日本地球惑星科学連合 2008 年大会 (*Japan Geoscience Union Meeting*), V231-P010.
- Lipman, P.W., 1997, Subsidence of ash-flow calderas: relation to caldera size and magma-chamber geometry. *Bull. Volcanol.*, **59**, 198-218.
- 松本哲一・宇都浩三・小野晃司・渡辺一徳 (Matsumoto, A., Uto, K., Ono, K. and Watanabe, K.), 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 (*1991 Fall Meet. Volcanol. Soc. Japan, Abst.*), 73.
- 松本幡朗 (Matsumoto, H.), 1974, 砥川溶岩について. 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **19**, 19-24.
- Matumoto, T., 1943, The four gigantic caldera volcanoes of Kyusyu. *Japan. Jour. Geol. Geogr.*, **19**, 1-57.
- Milner, D.M., Cole, J.M. and Wood, C.P., 2003, Mamaku Ignimbrite: a caldera-forming ignimbrite erupted from a compositionally zoned magma chamber in Taupo Volcanic Zone, New Zealand. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **122**, 243-264.
- 三浦大助・和田穰隆 (Miura, D. and Wada, Y.), 2007, 西南日本弧前縁の圧縮テクトニクスと中期中新世カルデラ火山. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **113**, 283-295.
- 宮縁育夫・星住英夫・高田英樹・渡辺一徳・徐 勝 (Miyabuchi, Y., Hoshizumi, H., Takada, H., Watanabe, K. and Sheng, X.), 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 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **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 (Miyoshi, M., Furukawa, K., Shinmura, T., Hasenaka, T. and Shimono, M.), 2009, 阿蘇カルデラ外輪山に分布する先阿蘇火山岩溶岩類の岩石記載と全岩化学組成. 地質雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **115**, 672-687 (本特集号).
- 三好雅也・長谷中利昭・佐野貴司 (Miyoshi, M., Hasenaka, T. and Sano, T.), 2005, 阿蘇カルデラ形成後に活動した多様なマグマとそれらの成因関係について. 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **50**, 269-283.
- Nakada, S. and Kamata, H., 1991, Temporal change in chemistry of magma source under Central Kyushu, Southwest Japan: progressive contamination of mantle wedge. *Bull. Volcanol.*, **53**, 182-194.
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO), 1991, 平成 2 年度全国地熱資源総合調査 (第 3 次) 広域熱水流動系調査阿蘇地域 火山岩分布・年代調査報告書要旨 (NEDO Press), 280p.
- 小野晃司 (Ono, K.), 1965, 阿蘇カルデラ東部の地質. 地学雑 (*Jour. Geol. Soc. Japan*), **71**, 541-553.
- 小野晃司・松本徹夫・宮久三千年・寺岡易司・神戸信和 (Ono, K., Matsumoto, Y., Miyahisa, M., Teraoka, Y. and Kambe, N.), 1977, 竹田地域の地質 (5 万分の 1 地質図幅) [*Geology of the Takeda Districts. Quadrangle Series, scale 1: 50,000*]. 地質調査所 (Geol. Surv. Japan).
- 小野晃司・渡辺一徳 (Ono, K. and Watanabe, K.), 1983, 阿蘇カルデラ. 月刊地球 (*Chikyu Monthly*), **5**, 73-82.
- 小野晃司・渡辺一徳 (Ono, K. and Watanabe, K.), 1985, 5 万分の 1 阿蘇火山地質図 [*Geol. Map Volcano., 1: 50,000, Aso*]. 地質調査所 (Geol. Surv. Japan).
- Ono, K., Watanabe, K., Hoshizumi, H. and Ikebe, S., 1995, Ash eruption of the Naka-dake crater, Aso volcano, southwest Japan. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **66**, 137-148.
- Petterson, M.G., Beddoe-Stephens, B., Millward, D. and Johnson, E.W., 1992, A pre-caldra plateau-andesite field in the Borrowdale Volcanic Group of the English Lake District. *Jour. Geol. Soc. London*, **149**, 889-906.
- Saito, T., Ishikawa, N. and Kamata, H., 2007, Magnetic petrology of the 1991-1995 dacite lava of Unzen volcano, Japan: degree of oxidation and implication for the growth of lava domes. *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.*, **164**, 268-283.
- Shibata, T., Yoshikawa, M. and Sugimoto, T., 2007, Semi-automatic Chemical Separation System for Sr and Nd isotope analyses. *Jour. Mineral. Petrol. Sci.*, **102**, 298-301.
- 新村太郎・荒川洋二 (Shinmura, T. and Arakawa, Y.), 2007, 先阿蘇から後カルデラ期にかけてのマグマ特性の時間変化—火山岩類の Sr, Nd 同位体比からの考察—. 日本地球惑星科学連合 2007 年大会 (*Japan Geoscience Union Meeting*), V157-P007.
- Smith, R.L. and Bailey, R.A., 1968, Resurgent cauldrons. *Geol. Soc. Amer. Mem.*, **116**, 613-662.
- 高橋正樹 (Takahashi, M.), 1995, 大規模珪長質火山活動と地殻歪速度. 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **40**, 33-42.
- 巽 好幸 (Tatsumi, Y.), 1995, 沈み込み帯のマグマ学 [*Subduction Zone Magmatism A Contribution to Whole Mantle Dynamics*]. 東京大学出版会 (Univ. Tokyo Press), 186p.
- 渡辺一徳 (Watanabe, K.), 2001, 阿蘇火山の生い立ち—地質が語る大地の鼓動 [*Development of Aso Volcano*]*. 一の宮町史自然と文化阿蘇選書 7, 一の宮町 (Ichinomiya, Kumamoto), 241p.
- 渡辺一徳・板谷徹丸・小野晃司・高田英樹 (Watanabe, K., Itaya, T., Ono, K. and Takada, H.), 1989, 阿蘇カルデラ南西部の岩脈群の K-Ar 年代. 火山 (*Bull. Volcanol. Soc. Japan*), **34**, 189-195.

* English translation from the original written in Japanese

(要 旨)

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. (Furukawa, K., Miyoshi, M., Shinmura, T., Shibata, T. and Arakawa, Y., 2009, Geology and petrology of the pre-Aso volcanic rocks distributed in the NW wall of Aso Caldera: eruption style and magma plumbing system of the pre-caldera volcanism. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **115**, 658–671.)

先カルデラ火山活動期の噴火活動およびマグマ供給系を明らかにするため、カルデラ北西壁に分布する先阿蘇火山岩類の地質調査、全岩化学分析および Sr, Nd 同位体比分析を行った。カルデラ北西壁は、主に安山岩溶岩から構成され、一部にデイサイト溶岩が分布する。これらの比較的穏やかな噴火様式からカルデラ噴火への噴火様式の変遷は、豊肥火山地域における地殻歪速度の減少に起因している可能性がある。また先阿蘇火山岩類の全岩化学組成は、カルデラ形成期以降の噴出物と大局的には類似している。このことは、先カルデラ火山活動期のマグマがカルデラ形成期と同じく、地殻物質の溶融により生成されたことを示唆する。一方で、Sr 同位体比は先阿蘇火山岩類とカルデラ形成期の噴出物で異なる。つまり先カルデラ火山活動期とカルデラ形成期のマグマは、全岩化学組成は類似するが、同位体組成が異なる地殻を溶融することにより生成されたのかもしれない。