



第四紀研究における年代測定法の新展開

—最近 10 年間の進展—

(II) 放射線損傷年代・放射年代

中部九州阿蘇地域における長期的な火山活動変遷

三 好 雅 也

宮 縁 育 夫

新 村 太 郎

角 野 浩 史

Long-term volcanic activity in Aso area,
central Kyushu, Japan

Masaya Miyoshi • Yasuo Miyabuchi • Taro
Shinmura • Hirochika Sumino

みよし まさや : 福井大学教育地域科学部

みやぶち やすお : 熊本大学教育学部

しんむら たろう : 熊本学園大学経済学部

すみの ひろちか : 東京大学大学院理学系研究科
地殻化学実験施設

著者らによる最近約 10 年間の火山層序学的, 年代学的, 岩石・地球化学的研究により, 中部九州阿蘇地域における長期的火山活動の詳細が明らかになってきた. 本論では主にこれまでに報告された火山岩の年代値に基づき, 過去 400 万年間の阿蘇地域における火山活動の変遷について述べる.

1. はじめに

火山の活動履歴および変遷を明らかにすることは, その火山が将来どのような噴火活動を引き起こしうるかを推測する上で重要である. 特に, カルデラ形成噴火のような人類がほとんど未経験である超巨大噴火について, その活動時期や時空分布などを詳細に調べることは火山学におけるひとつの重要課題といえる. そのためには, 年代学的研究によってカルデラ形成噴火の前後を含めた長期的な火山活動の変遷を明らかにすることが不可欠となるであろう.

年代測定手法開発やその技術に関する議論は他の論文に任せるとし, 本論では主に年代測定手法の応用例として, 著者らの主要な研究対象である中部九州阿蘇地域の火山活動史についてレビューする. 阿蘇火山は, 4 回の大規模火砕噴火 (Aso-1 ~ Aso-4) によって形成された日本で二番目に大きいカルデラ (18 km × 25 km) を有する火山である (小野・渡辺, 1985) (図 1). 阿蘇火山および周辺域を対象としたこれまでの火山層序学的, 年代学的, 岩石・地球化学的研究により, 先カルデラ期, カルデラ形成期, 後カルデラ期からなる過去 400 万年間の長期的な火山活動の変遷が明らかになってきた. 年代学的研究では, 主に K-Ar 年代測定法や ^{14}C 年代測定法が力を発揮しており, これらの手法を用いた著者らの最近約 10 年間の研究は, 詳細な後カルデラ期火山活動史の解明に貢献してきた. 特にカルデラ形成期以降の珪長質火山岩は High-K から Shoshonite 系列 (Rickwood, 1989) に分類されるほど K に富む (図 2) ため, K-Ar 年代測定法の適用対象として最適であり, 実際の層序と整合的な信頼度の高い年代値が報告されてきている (松本ほか, 1991 ; Miyoshi *et al.*, 2012).

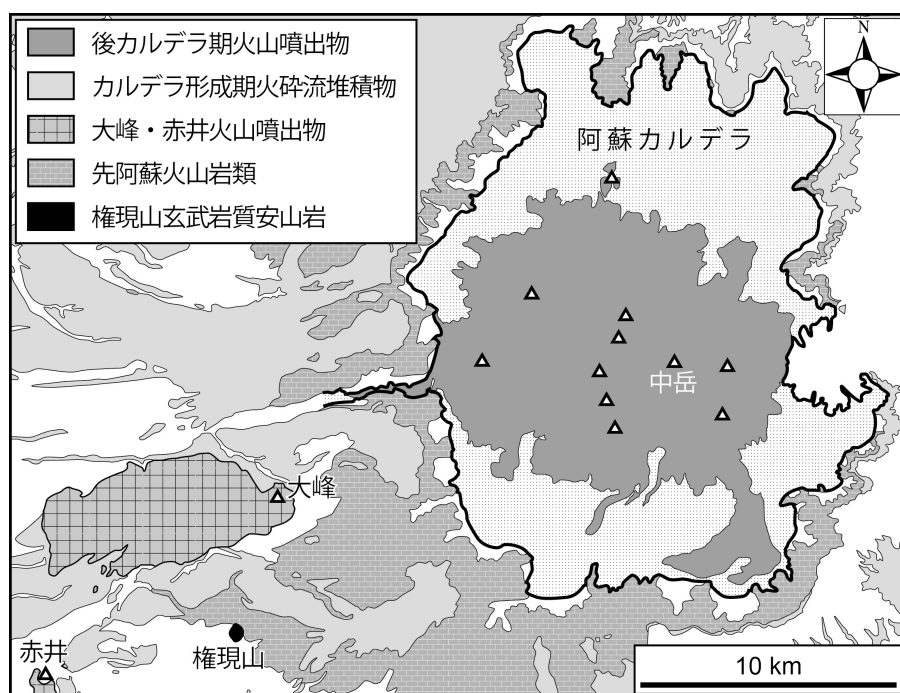


図1 阿蘇地域周辺における先カルデラ期、カルデラ形成期および後カルデラ期火山噴出物の分布 (小野・渡辺, 1985; 熊本県地質図編纂委員会, 2008 を簡略化)。

本論では、上記年代研究の成果および現在までに報告された地質学的、岩石・地球化学的研究結果を総括し、過去 400 万年間の阿蘇地域における火山活動の変遷について簡潔に記す。

2. 先カルデラ期の火山活動と年代

カルデラ形成前 (270 ka より前) の阿蘇地域における火山噴出物は、小野 (1965) によって「先阿蘇火山岩類」とよばれた。先阿蘇火山岩類の岩石学的特徴はカルデラ形成期以降の噴出物とは異なり、全岩 SiO_2 含有量に対する K_2O および液相濃集元素含有量が乏しい (小野・渡辺, 1985; 三好ほか, 2009)。先阿蘇火山岩類はカルデラ壁およびカルデラ周辺域に分布 (図 1) し、カルデラ形成期火砕流堆積物によって不整合に覆われる (小野, 1965)。先阿蘇火山岩類の分布範囲の大部分を厚い溶岩が占めること (小野・渡辺, 1985) から、カルデラ形成前の火山活動では溶岩流の噴出が卓越したことがうかがえる。現在地表で確認できる先阿蘇火山岩類の岩質は、玄武岩から流紋岩まで幅広いが、安山岩が最も卓越している (小

野・渡辺, 1985)。カルデラ形成期の大規模火砕噴火により先阿蘇火山岩類の原地形は破壊され、残存部の大部分がより新期の堆積物によって覆われている。そのため先阿蘇火山岩類の露出は断片的であり、噴出物層序の大部分は不明である。

先阿蘇火山岩類の活動時期は、主に全岩試料を対象とした K-Ar 年代測定により調査されてきた。カルデラ壁とその周辺に分布する玄武岩～流紋岩溶岩類 (NEDO, 1991; 兼岡・小嶋, 1970; 鎌田, 1985; Itaya *et al.*, 1984) およびカルデラ壁南西部の岩脈群 (渡辺ほか, 1989) の年代測定結果は、概ね 0.8 ~ 0.4 Ma の間に集中する (図 3)。カルデラ西方に位置する権現山を構成する玄武岩質安山岩溶岩 (図 1) は、阿蘇地域周辺において最も古い火山岩のひとつである。権現山玄武岩質安山岩が先阿蘇火山岩類に含まれるという記載はないが、過去に阿蘇地域周辺で活動した溶岩ということは確かであるため、本論では先カルデラ期の火山岩として記述する。本溶岩について、NEDO (1991) が 3.9 ~ 3.8 Ma の K-Ar 年代値 (全岩) を報告している。さらに近年、新村ほか (2008) が

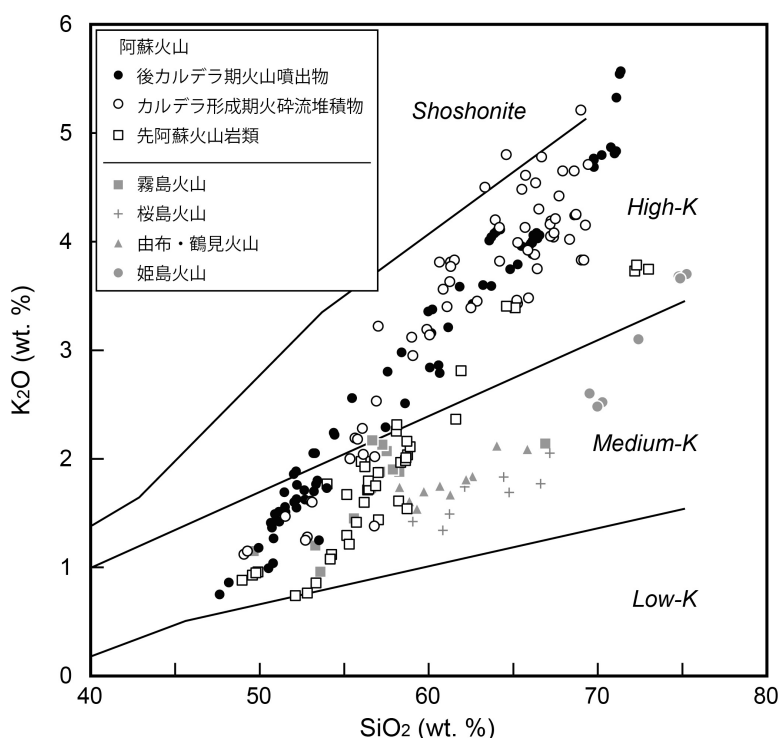


図2 SiO₂ vs. K₂O図による阿蘇火山噴出物と他の九州火山フロント火山岩類との比較。各火山噴出物の化学組成データは以下から引用：阿蘇火山後カルデラ期火山噴出物(三好ほか, 2005)；カルデラ形成期火砕流堆積物(Hunter, 1998；Kaneko *et al.*, 2007)；先阿蘇火山岩類(三好ほか, 2009)；霧島火山(井村・小林, 2001)；桜島火山(福山・小野, 1981)；由布・鶴見火山(Sugimoto *et al.*, 2006)；姫島火山(伊藤, 1990)。Low-K, Medium-K, High-K, Shoshonite 岩系の境界はRickwood (1989) による。

3.9 ± 0.1 Ma の K-Ar 年代値(全岩)を報告している(図3)。上記研究で実施された Ar 同位体分析は、全て ³⁸Ar をスパイクとして用いた同位体希釈法によるものである。

3. カルデラ形成期の火山活動と年代

カルデラ形成期には4回の大規模火砕噴火(Aso-1～Aso-4)が発生し、現在のカルデラ地形(南北約25 km, 東西約18 km)の原形が形成された(小野・渡辺, 1985；渡辺, 2001)。各火砕流堆積物の体積は、Aso-1 (50 km³)、Aso-2 (50 km³)、Aso-3 (> 150 km³)、Aso-4 (600 km³)と見積もられており(第四紀火山カタログ委員会, 1999)、最大規模のAso-4噴火は「破局噴火」(火山爆発指数=7)に相当する。

4回の大規模火砕噴火(Aso-1～Aso-4)の各噴火サイクルにおいて、噴出物には化学組成の時間変化が認められる。特にAso-2～Aso-4において、初期の珪長質から後期の苦鉄質へと噴出物の化学組成が変化する傾向がある(小野・渡辺, 1983；

渡辺, 2001)。Aso-4噴火サイクルには、短い休止期間を挟み2回のサブサイクルがあり、各サブサイクルにおいて珪長質から苦鉄質への化学組成時間変化がみられる(渡辺, 2001；Kaneko *et al.*, 2007)。Aso-1噴出物の化学組成幅は狭いため、化学組成の系統的時間変化は不明瞭である(渡辺, 2001)。

カルデラ形成期火山噴出物の年代値は、主に放射年代測定法および層位年代に基づいて明らかにされてきた。松本ほか(1991)は、火砕流堆積物中の本質レンズ、二次流動部、気相再結晶部、強溶結部全体、砕屑岩中の黒曜石ブロックなどを対象としたK-Ar年代測定を実施し、4回の火砕流堆積物の年代値を以下のように報告した：Aso-1 (266 ± 14 ka)、Aso-2 (141 ± 5 ka)、Aso-3 (123 ± 6 ka)、Aso-4 (89 ± 7 ka)(図3)。これら試料のAr同位体分析には感度法が用いられた(松本ほか, 1991)。Aso-4噴火のテフラは後期更新世の重要な指標テフラのひとつであるため、その他の手法による年代測定も盛んに行われてきた。例えば、フィッシュン・トラック法により84 ± 25 ka

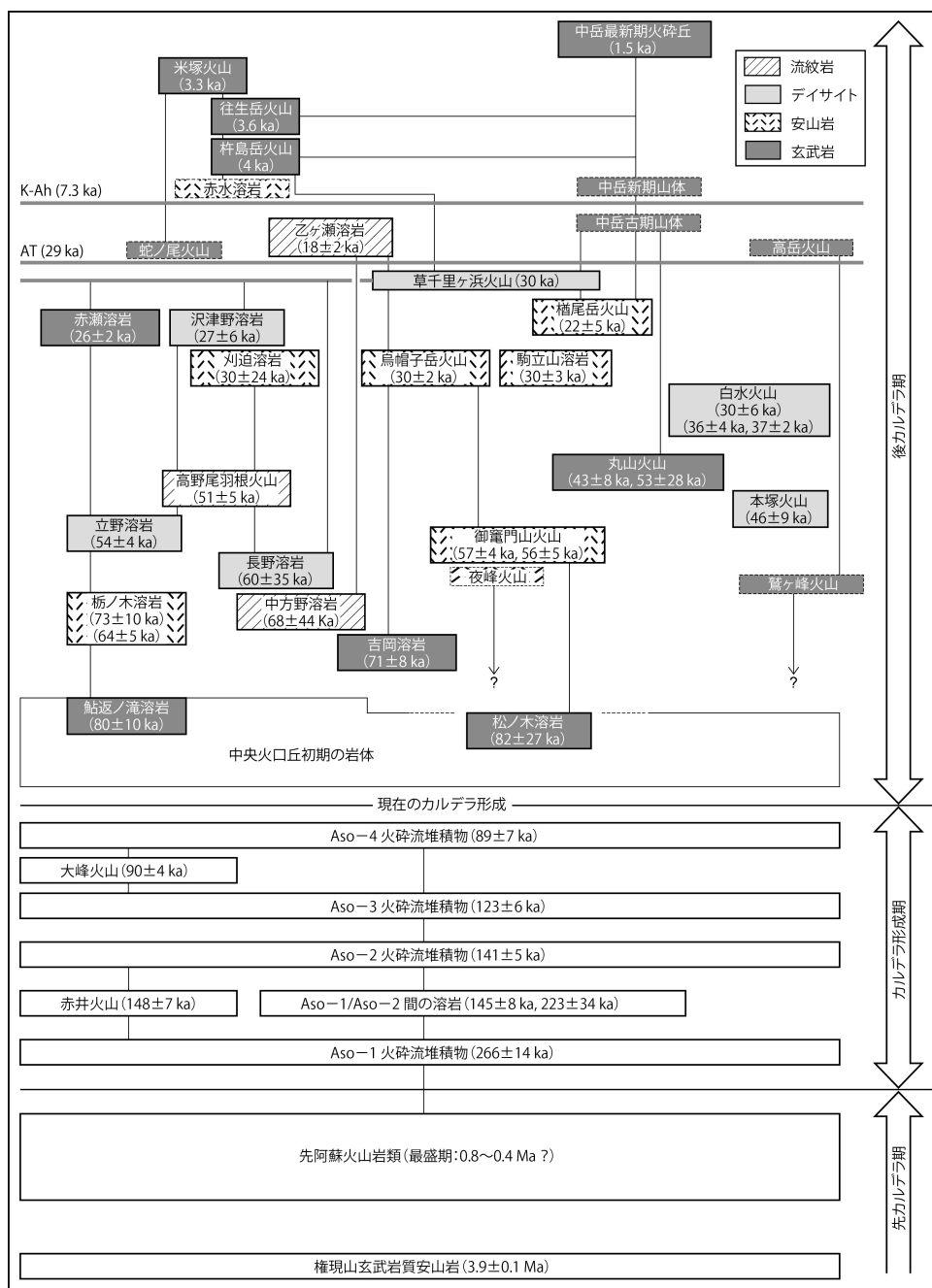


図3 阿蘇地域における過去400万年間の火山活動史。図中の年代値は、兼岡・小嶋(1970); Itaya *et al.* (1984); 鎌田(1985); 渡辺ほか(1989); NEDO(1991); 松本ほか(1991); 宮縁・渡辺(1997); 新村ほか(2008); Miyabuchi(2009); 宮縁(2010); Miyoshi *et al.* (2012) から引用。K-Ah, ATはそれぞれ鬼界アカホヤテフラ, 始良Tnテフラを示す(町田・新井, 2003; 奥野, 2002)。後カルデラ期火山噴出物のうち点線で囲まれたユニットは年代報告値がないものである。

(玉生, 1978), ESR 法により 83 ± 14 ka (澤田ほか, 1984), U/Th 法により 80 ± 2 ka (大村ほか, 1988) の年代値が報告されている。また, Aso-4 噴火のテフラは四国海盆の掘削コア試料中に見出され, その層位が深海底堆積物の酸素同位体比層序のステージ 5b から 5a への移行期 (90 ~ 86 ka) であることが示された (町田ほか, 1985; 大場, 1991)。上記の放射年代, 層位年代を総合し, 町田ほか (1992) では Aso-4 テフラの年代を 90 ~ 85 ka としている。さらに近年, 日本海溝前弧海盆で得られたコア試料中に Aso-4 テフラが見出され, 酸素同位体比層序に基づき 87.3 ~ 86.8 ka の年代値が報告されている (Aoki, 2008)。

カルデラ形成期には, カルデラ内外においても複数の小規模噴火が発生している。Itaya *et al.* (1984) は, カルデラ壁北西部の石地域に分布する Aso-1, Aso-2 間の溶岩の全岩試料について K-Ar 年代測定 (同位体希釈法) を行い, 174 ± 9 ka, 186 ± 9 ka の年代値を報告した。その後, 松本ほか (1991) は, Aso-1, Aso-2 間の溶岩 (試料採取地点は不明) の石基試料を対象とした K-Ar 年代測定 (感度法) を行い, 145 ± 8 ka, 223 ± 34 ka の年代値を報告している (図 3)。カルデラ西側 (外側) に位置する赤井火山, 大峰火山 (図 1) はこの時期に形成された火砕丘であり (渡辺, 2001), 阿蘇火山の側火山と考えられている (渡辺ほか, 1979)。赤井火山, 大峰火山はそれぞれ砥川溶岩 (松本, 1974), 高遊原溶岩 (渡辺・小野, 1969; 渡辺ほか, 1979) を噴出させた。Itaya *et al.* (1984) は, 高遊原溶岩の全岩試料について K-Ar 年代測定 (同位体希釈法) を行い, 89 ± 10 ka, 123 ± 10 ka の年代値を報告した。その後, 松本ほか (1991) は, 石基試料の K-Ar 年代測定 (感度法) により, 大峰火山, 赤井火山噴出物からそれぞれ 90 ± 4 ka, 148 ± 7 ka の年代値を報告した (図 3)。

4. カルデラ形成後 (中央火口丘群) の火山活動と年代

カルデラ形成後の火山活動は, カルデラ内における複数の成層火山および単成火山 (中央火口丘

群) の形成で特徴付けられる。地形, 火山層序によって識別できる後カルデラ期火山噴出物はおおよそ 30 ユニットにおよぶ (鮎返ノ滝溶岩, 栃ノ木溶岩, 立野溶岩, 吉岡溶岩, 乙ヶ瀬溶岩, 長野溶岩, 苅迫溶岩, 赤瀬溶岩, 沢津野溶岩, 赤水溶岩, 中方野溶岩, 駒立山溶岩と, 御竈門山火山, 白水火山, 本塚火山, 中岳火山, 高野尾羽根火山, 草千里ヶ浜火山, 夜峰山火山, 丸山火山, 高岳火山, 槇尾岳火山, 杵島岳火山, 往生岳火山, 米塚火山, 蛇の尾火山, 鷲ヶ峰火山, 古期小火山体の噴出物: 小野・渡辺, 1985; 渡辺, 2001; 増田ほか, 2004; 宮縁ほか, 2004a; 図 3)。上記の主要噴出物のほかに, 爆発的噴火による中央火口丘群起源のテフラ層がカルデラ内外において複数ユニット認められている (宮縁ほか, 2003, 2004b; 長岡・奥野, 2004; Miyabuchi, 2009, 2011)。現在の中央火口丘群下位には多量の火山岩類 (早期の中央火口丘群噴出物) が存在するということが重力データ (Komazawa *et al.*, 1995) およびボーリング調査結果 (宇都ほか, 1994) などから指摘されており, それらを含めた中央火口丘群全体の体積は 112 km^3 と見積もられている (Miyabuchi, 2009)。

後カルデラ期の火山活動史は, K-Ar 年代測定法および ^{14}C 年代測定法により明らかにされてきた。前者はカルデラ形成後 ~ 約 20 ka の間, 後者は約 30 ka 以降の火山噴出物に適用されている。松本ほか (1991) は, 石基試料の K-Ar 年代測定 (感度法) により, 栃ノ木溶岩, 高野尾羽根火山, 本塚火山噴出物, 白水火山噴出物, 沢津野溶岩からそれぞれ 73 ± 10 ka, 51 ± 5 ka, 46 ± 9 ka, 30 ± 6 ka, 27 ± 6 ka の年代値を報告した。その後, Miyoshi *et al.* (2012) は, 石基試料の K-Ar 年代測定 (感度法) により, 下記 12 ユニットの年代値を報告した: 鮎返ノ滝溶岩 (80 ± 10 ka), 松ノ木溶岩 (82 ± 27 ka), 吉岡溶岩 (71 ± 8 ka), 中方野溶岩 (68 ± 44 ka), 栃ノ木溶岩 (64 ± 5 ka), 御竈門山火山噴出物 (溶岩) (57 ± 4 ka, 56 ± 5 ka), 立野溶岩 (54 ± 4 ka), 丸山火山噴出物 (溶岩) (43 ± 8 ka, 53 ± 28 ka), 白水火山噴出物 (溶岩) (36 ± 4 ka, 37 ± 2 ka), 駒立山溶岩 (30 ± 3 ka),

烏帽子岳火山噴出物(溶岩) (30 ± 2 ka), 苅迫溶岩 (30 ± 24 ka), 赤瀬溶岩 (26 ± 2 ka), 榑尾岳火山噴出物(溶岩) (22 ± 5 ka), 乙ヶ瀬溶岩 (18 ± 2 ka). 現在地表で観察できる最古の後カルデラ期溶岩である鮎返ノ滝溶岩は, 中央火口丘群の早期噴出物である可能性が指摘されている(渡辺, 2001). 松ノ木溶岩の年代値が鮎返ノ滝溶岩のそれと近いと, 松ノ木溶岩も中央火口丘群の早期噴出物である可能性があるが, 誤差が大きいため不明瞭である(図3). 後カルデラ期最大規模である草千里ヶ浜火山 (1.1 km^3 , 火山爆発指数 = 5) の噴火は, 降下軽石層直下の土壌の ^{14}C 年代測定により, 30 ka であると報告されている(Miyabuchi, 2009). 往生岳, 杵島岳, 中岳など比較的若い玄武岩質火山の活動は, それら火山起源スコリア層上下の黒ボク土層の ^{14}C 年代測定により調べられており, それぞれ 3.6 ka, 4.0 ka, 1.5 ka (校正暦年代) と報告されている(宮縁・渡辺, 1997; Miyabuchi, 2009). さらに近年, 宮縁(2010)は, 米塚溶岩下位土壌層の ^{14}C 年代測定により, 米塚火山の活動年代を 3.3 ka (校正暦年代) であると報告した. 上記のとおり, K-Ar 年代測定(感度法)および ^{14}C 年代測定法により後カルデラ期火山噴出物の 24 ユニットの年代値が報告されており, それらの値は実際の層序関係と概ね整合的である(図3).

5. 過去 400 万年間の阿蘇地域における火山活動の変遷

これまでの阿蘇地域における火山岩の年代研究の蓄積により, 過去 400 万年間の火山活動の変遷が明らかになってきた. 現在地表で観察できる阿蘇地域最古の火山岩は権現山玄武岩質安山岩溶岩である(約 4 Ma: NEDO, 1991; 新村ほか, 2008). 権現山玄武岩質安山岩の年代・岩質は, 北部九州の広範囲に分布する高マグネシア安山岩(Miyoshi *et al.*, 2008) と重複・類似するため, 権現山玄武岩質安山岩は現在とは異なる特異なテクトニック・セッティングで生じたマグマなのかもしれない. その他の先カルデラ期火山噴出物(先阿蘇火山岩類)の年代値(NEDO, 1991; 兼岡・小嶋,

1970; 鎌田, 1985; Itaya *et al.*, 1984) は 0.8 ~ 0.4 Ma に集中する. 約 4 Ma から 0.8 Ma の間に火山活動の時間間隙があったか否かは不明であるが, 0.8 ~ 0.4 Ma が先カルデラ期のひとつの活動最盛期であった可能性がある(三好ほか, 2009). 厚い溶岩流出を主体とする先阿蘇火山岩類の活動様式および年代は, 九州中北部鮮新統の広域引張応力場における大規模溶岩流の活動(鎌田, 1985) と一致・重複するため, 両者は一連の火山活動であった可能性がある.

非爆発的噴火主体であった先カルデラ期火山活動とは対照的に, カルデラ形成期は大規模火砕噴火を繰り返す爆発的火山噴火が主体である. 4 回の大規模火砕噴火のうち, Aso-2 ~ Aso-4 の噴出物化学組成には珪長質から苦鉄質への明瞭な時間変化が認められることから, それら大規模火砕噴火の前には組成累帯した単一の巨大なマグマ溜り(zoned magma chamber) が形成されていたと考えられている(小野・渡辺, 1983; 渡辺, 2001; Hunter, 1998; Kaneko *et al.*, 2007). 古川ほか(2009)は, 先カルデラ期の引張応力場がカルデラ形成期には変化し, 地殻中にマグマが蓄積されやすい場となった可能性を示している. 先阿蘇火山岩類のうち最も若い年代報告値は 0.36 Ma (NEDO, 1991) であるため, Aso-1 噴火までの約 9 万年間に応力場が変化し, 最初のカルデラ形成噴火のマグマが準備されたのかもしれない.

Aso-4 噴火後の後カルデラ期には, カルデラ内において複数の成層火山および単成火山を形成する火山活動へと活動様式がさらに変化した. 後カルデラ期火山噴出物の化学組成も玄武岩~流紋岩と多様であるが, カルデラ形成期のような系統的な時間変化はみとめられない. これらの地質学的観察事実から, 小野・渡辺(1983)は, 後カルデラ期の阿蘇火山直下にはカルデラ形成期のような単一の巨大なマグマ溜りは存在しなくなり, 複数の小規模マグマ溜りが形成されたというモデルを提案した. その後の岩石学的・地球化学的研究(三好ほか, 2005; Miyoshi *et al.*, 2011)は, このモデルを支持する結果を示している. また, 後カルデラ

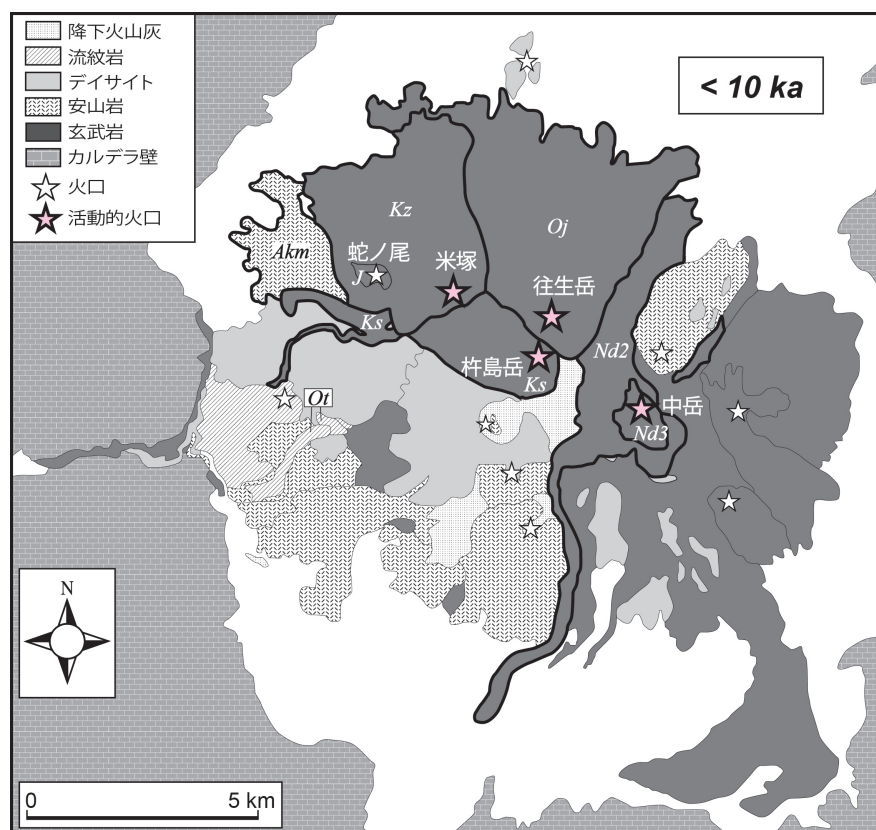


図4 阿蘇火山後カルデラ期火山噴出物の分布 (Miyoshi *et al.*, 2012 を簡略化). 太線で囲まれたユニットは約1万年前以降の火山噴出物. 図中の略字は以下の噴出物を指す: Akm (赤水溶岩); Ot (乙ヶ瀬溶岩); Kz (米塚火山噴出物); J (蛇ノ尾火山噴出物); Ks (杵島岳火山噴出物); Oj (往生岳火山噴出物); Nd2 (中岳新期山体火山噴出物); Nd3 (中岳最新期火砕丘火山噴出物).

期に活動した珪長質マグマは、Aso-4 マグマの残存物ではなく、後カルデラ期に新たに生成されたマグマである可能性がSr 同位体比を用いた研究により指摘されている (Miyoshi *et al.*, 2011). 後カルデラ期における最大の爆発的噴火は草千里ヶ浜火山 (デイサイト) であるが、その規模 (火山爆発指数=5) は、カルデラ形成噴火と比較すると1~2桁小さい。また、最近1万年間の活動は、主にカルデラ中央部における苦鉄質マグマの活動で特徴付けられ (宮縁・渡辺, 1997; Miyabuchi, 2009; 宮縁, 2010) (図4), 少なくとも過去1万年間にカルデラ直下に巨大な珪長質マグマ溜りは形成されなかった可能性がある (三好ほか, 2005; Miyoshi *et al.*, 2012). 上記事実は、Aso-4 噴火後は地殻中に大規模マグマ溜りが形成されにくくなったことを示唆する。この原因として、カルデラ形成に伴うマグマ溜り天井部の破砕 (小野・渡辺,

1983) により、マグマが蓄積されにくくなったことなどが考えられるが、詳細は明らかになっておらず、今後の課題である。

6. まとめ

上述のとおり、阿蘇地域における火山活動様式および活動したマグマの化学組成は、過去400万年間に劇的に変化してきている。約4 Maの高マグネシア安山岩の活動の後、0.8~0.4 Ma頃に集中して大規模溶岩流の噴出が生じた。その後、0.27~0.09 Ma頃の大規模火砕噴火により陥没カルデラが形成された。また、同時期にカルデラ内外において小規模な単成火山活動があった。最後の大規模火砕噴火 (Aso-4 噴火) 直後には、カルデラ中央で複数の成層火山・単成火山を形成する活動が開始し、現在に至っている。著者らによる最近約10年間の火山層序学的、年代学的、岩石・

地球化学的研究は、特に後カルデラ期火山活動に関する理解をいくらか進めたといえよう。しかしながら、現在の中央火口丘群の下には初期の岩体の大部分が埋積されているため、Aso-4 噴火直後の火山活動については未知の部分が大きい。この部分に関しては、カルデラ内で掘削されたボーリングコア試料の放射年代測定などにより今後明らかにしてゆくことが必要であろう。

参考文献

- [1] Aoki, K. (2008) : Revised age and distribution of ca. 87 ka Aso-4 tephra based on new evidence from the northwest Pacific Ocean. *Quaternary International*, 178, 100-118.
- [2] 第四紀火山カタログ委員会 (1999) : 日本の第四紀火山カタログ. Ver. 1.0. 日本火山学会, CD-ROM.
- [3] 福山博之・小野晃司 (1981) : 桜島火山地質図 (2 万 5 千分の 1). 火山地質図 1, 地質調査所.
- [4] 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. 地質学雑誌, 115, 658-671.
- [5] Hunter, A. G. (1998) : Intracrustal controls on the coexistence of tholeiitic and calcalkaline magma series at Aso volcano, SW Japan. *Journal of Petrology*, 39, 1255-1284.
- [6] 井村隆介・小林哲夫 (2001) : 霧島火山地質図 (5 万分の 1). 火山地質図 11, 地質調査所.
- [7] Itaya, T., Nagao, K., Nishido, H., Ogata, K. (1984) : K-Ar age determination of late Pleistocene volcanic rocks. *Journal of the Geological Society of Japan*, 12, 899-909.
- [8] 伊藤順一 (1990) : 姫島火山群の岩石学. 岩鉱, 85, 541-558.
- [9] 鎌田浩毅 (1985) : 熊本県宮原西方の火山岩類の層序と噴出年代 - 九州中北部の火山活動の時代と分布 -. 地質学雑誌, 91, 289-303.
- [10] Kaneko, K., Kamata, H., Koyaguchi, T., Yoshikawa, M., Furukawa, K. (2007) : Repeated large-scale eruptions from a single compositionally stratified magma chamber : An example from Aso volcano, southwest Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 167, 160-180.
- [11] 兼岡一郎・小嶋稔 (1970) : 日本の火山岩の放射性元素年代. 火山, 15, 10-21.
- [12] Komazawa, M. (1995) : Cravimetric analysis of Aso volcano and its interpretation. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 41, 17-45.
- [13] 熊本県地質図編纂委員会 (2008) : 熊本県地質図 (10 万分の 1) (県北版・県南版・説明書). 熊本県地質調査業協会, 119pp.
- [14] 町田洋・新井房夫 (2003) : 新編火山灰アトラス. 東京大学出版会, 336pp.
- [15] 町田洋・新井房夫・百瀬貢 (1985) : 阿蘇 4 火山灰 - 分布の広域性と後期更新世指標層としての意義. 火山, 30, 49-70.
- [16] 増田直朗・渡辺一徳・宮縁育夫 (2004) : 阿蘇中央火口丘群西側斜面において新たに発見された流紋岩〜デイサイト質溶岩流. 火山, 49, 119-128.
- [17] 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応 -. 日本火山学会 1991 年秋季大会講演予稿集, 73.
- [18] 松本幡郎 (1974) : 砥川溶岩について. 火山, 19, 19-24.
- [19] Miyabuchi, Y. (2009) : A 90,000-year tephrostratigraphic framework of Aso volcano, Japan. *Sedimentary Geology*, 220, 169-189.
- [20] 宮縁育夫 (2010) : 阿蘇火山, 米塚の噴火年代. 火山, 55, 219-225.
- [21] Miyabuchi, Y. (2011) : Post-caldera explosive activity inferred from improved 67-30 ka tephrostratigraphy at Aso volcano, Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 205, 94-113.
- [22] 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.
- [23] 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 9 万年間の降下軽石堆積物. 火山, 48, 195-214.
- [24] 宮縁育夫・増田直朗・渡辺一徳 (2004a) : 溶岩流とテフラとの層序関係からみた阿蘇火山中央火口丘群西部地域の発達史. 火山, 49, 267-282.
- [25] 宮縁育夫・星住英夫・渡辺一徳 (2004b) : 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. 49, 51-64.
- [26] 三好雅也・長谷中利昭・佐野貴司 (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, 50, 269-283.
- [27] Miyoshi, M., Nasu, T., Tajima, T., Kido, M., Mori, Y., Hasenaka, T., Shibuya, H., Nagao, K. (2008) : K-Ar ages of high-magnesian andesite lavas from northern Kyushu, Japan. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 103, 183-191.
- [28] 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. 地質学雑誌, 115, 672-687.
- [29] Miyoshi, M., Shibata, T., Yoshikawa, M., Sano, T., Shinmura, T., 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. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 106, 114-119.
- [30] Miyoshi, M., Sumino, H., Miyabuchi, Y., Shinmura, T., Mori, Y., Hasenaka, T., Furukawa, K., Uno, K., Nagao, K. (2012) : K-Ar ages determined for post-caldera volcanic products from Aso volcano, central Kyushu, Japan. *Journal*

- of Volcanology and Geothermal Research, 229-230, 64-73.
- [31] 長岡信治・奥野充 (2004): 阿蘇火山中央火口丘群のテフラ層序と爆発的噴火史. 地学雑誌, 113, 425-429.
- [32] NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) (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. 280pp.
- [33] 奥野充 (2002): 南九州に分布する最近3万年間のテフラの年代学的研究. 第四紀研究, 41, 225-236.
- [34] 小野晃司 (1965): 阿蘇カルデラ東部の地質. 地質学雑誌, 71, 541-553.
- [35] 小野晃司・渡辺一徳 (1983): 阿蘇カルデラ. 月刊地球, 5, 73-82.
- [36] 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.
- [37] 大場忠道 (1991): 酸素同位体比層序からみた阿蘇4テフラおよび阿多テフラ. 月刊地球, 13, 224-227.
- [38] 大村昭雄・河合貞行・玉生志郎 (1988): ^{238}U - ^{230}Th 放射非平衡系による火山噴出物の年代測定. 地質調査所月報, 39, 559-572.
- [39] Rickwood, P.C. (1989): Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. Lithos, 22, 247-263.
- [40] 澤田臣啓・田中竹延・岸清 (1984): 断層ガウジ及び火山灰を用いたESR年代測定と石英粒子表面構造観察. 日本地質学会第91年学術大会演旨, 564p.
- [41] 新村太郎・荒川洋二・三好雅也・長谷中利昭 (2008): 熊本県西原村権現山に産する高マグネシア安山岩のK-Ar年代. 熊本学園大学論集『総合科学』, 14, 23-37.
- [42] Sugimoto, T., Shibata, T., Yoshikawa, M., Takemura, K. (2006): Sr-Nd-Pb isotopic and trace element compositions of the Yufu-Tsurumi volcanic rocks: implications for the magma genesis of the Yufu-Tsurumi volcanoes, Northeast Kyushu, Japan. Journal of Mineralogical and Petrological Sciences 101, 270-275.
- [43] 玉生志郎 (1978): ガラスによるフィッシュン・トラック年代測定. 日本地質学会85年大会要旨, 288p.
- [44] 宇都浩三・阪口圭一・渋谷明貴・吉岡恒 (1994): 阿蘇カルデラ内の深部ボーリングコアのK-Ar年代測定: カルデラ形成直後の火山活動史の解明. 日本火山学会1994年秋季大会講演予稿集, 211p.
- [45] 渡辺一徳 (2001): 阿蘇火山の生い立ち―地質が語る大地の鼓動―. 一の宮町史自然と文化阿蘇選書7, 一の宮町史編集委員会, 242pp.
- [46] 渡辺一徳・小野晃司 (1969): 阿蘇カルデラ西側, 大峰付近の地質. 地質学雑誌, 75, 365-374.
- [47] 渡辺一徳・粕倉克幹・鶴田孝三 (1979): 阿蘇カルデラ西麓の活断層群と側火口の位置. 第四紀研究, 18, 89-101.
- [48] 渡辺一徳・板谷徹丸・小野晃司・高田英樹 (1989): 阿蘇カルデラ南西部の岩脈群のK-Ar年代. 火山, 34, 189-195.

