



国際火山噴火史情報研究-II
—噴火史とその関連研究—

阿蘇3, 阿蘇4 間テフラ に含まれる鉱物中の メルト包有物

—カルデラ噴火前のマグマ供給系の推定—

杉山 芙実子
長谷中 利昭
安田 敦
外西 奈津美
森 康

Melt inclusions in minerals from tephra
between Aso-3 and Aso-4: estimation of
magma plumbing system before caldera-
forming eruption

Fumiko Sugiyama • Toshiaki Hasenaka •
Atsushi Yasuda • Natsumi Hokanishi • Yasushi
Mori

すぎやま ふみこ : 熊本大学大学院自然科学研究科
はせなか としあき : 熊本大学くまもと水循環・
減災研究教育センター
やすだ あつし : 東京大学地震研究所
ほかにし なつみ : 東京大学地震研究所
もり やすし : 北九州市立いのちのたび博物館

カルデラ形成噴火を繰返した阿蘇火山などのマグマ供給システムが巨大噴火の間どのような変遷を辿っているのかを知る事は、カルデラ噴火の発生メカニズムの解明や長期噴火予測のため重要なテーマである。阿蘇カルデラの4回の巨大噴火のうち、阿蘇3, 阿蘇4の間に活動した阿蘇 ABCD テフラについて、全岩組成、鉱物組成、鉱物に含まれるメルト包有物組成を求めた。マグマの組成や鉱物組成で比較すると、阿蘇 ABCD テフラは阿蘇4よりは阿蘇3に近いことがわかった。阿蘇4の9000年前に活動したマグマは、阿蘇4の準備過程ではなく、阿蘇3の残存マグマの可能性が大きいと考えられる。

1. はじめに

カルデラを形成するような巨大噴火のマグマ供給系の情報は、地球物理学的な観測記録がないので、地球物質科学的な手法で探求することが重要な役割を占める。阿蘇4巨大噴火を起こしたマグマ溜まりがどのように成長し、噴火に至ったかを知る手がかりを与えてくれる前駆噴火として、大峰火山、阿蘇 ABCD テフラがあげられる。前者は阿蘇4の直前 (90±4 ka) [1] ではあるが、カルデラ外で噴火が起こっており、本体の阿蘇4マグマ溜まりとは異なる分化経路をたどったことがわかってきた [2]。本論では、カルデラ内噴火が推定される阿蘇 ABCD テフラのマグマ供給系のメルト組成、鉱物組成について考察する。

阿蘇4噴火 (89±7 ka) と阿蘇3噴火 (123±6 ka) の間には、何枚かのテフラ (A, B, C, D, . . . , M, N, α, β, . . . , η) が記載されている [1, 3]。このうち Aso-ABCD テフラは最上位に位置する四つのテフラで、連続した一連の噴火を表している。長橋・他 [4] は Aso-ABCD テフラ年代を 97.7 ka と見積もった。テフラの等層厚線から給源は阿蘇カルデラ内・中央火口丘群の南側に推定されるので [3]、阿蘇1, 2, 3, 4などのカルデラ形成を起こしたマグマ溜まりと共通の起源である可能性が高い。噴出物の推定体積は 3.5 km³ で、阿蘇4, 阿蘇3間では最大規模の噴火であるが、600 km³ 以上ある阿蘇4

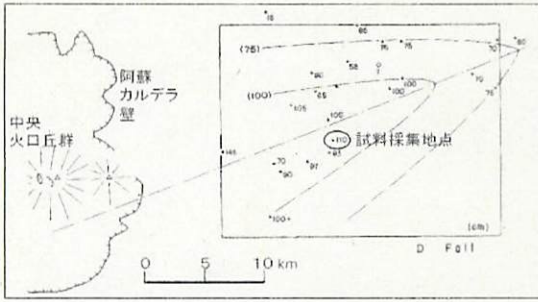


図1 試料採集地点. カルデラ縁東側と阿蘇Dテフラの等厚厚線図を示す. 小野・他^[3]の図に加筆.

と比べると1%に満たない^[5]. カルデラ形成までに至らなかった小規模噴火である.

2. 採集試料と分析手法

阿蘇カルデラ東方約20 kmの大分県竹田市荻町野鹿の露頭でAso-ABCDテフラの軽石および火山灰を採集した. 本露頭では阿蘇4火砕流堆積物の下にAso-ABCDテフラが全層厚3 mの降下軽石層と降下火山灰層の互層として露出する. A (軽石層110 cm) B (黒色火山灰層7 cm) C (軽石火山灰互層80 cm) D (軽石層110 cm, 岩片と黒曜石を含む)の各層の間には土壌を挟まないで、一連の噴火イベントだと考えられる. 阿蘇4と阿蘇Aテフラの間には土壌が記載されているが^[3], 試料採集地点では最上部のA層は浸食され, 上部の阿蘇4火砕流堆積物と直接接している. 最下部のD層の下は土壌である. 試料採集位置を図1に示す.

採取した岩石試料および分離した鉱物粒の薄片の偏光顕微鏡観察を行い, 岩石・鉱物記載を行った. 軽石および火山灰試料の全岩化学組成はMori and Mashima^[6]の方法に従い, 北九州いのちのたび博物館の蛍光X線装置を用いて求めた.

鉱物およびガラスの組成分析は東京大学地震研究所のEPMA (JEOL JXA-8800R) あるいは熊本大学のFE-SEM (JEOL製JSM7001F) EDS (Oxford社製)を用いた. 分析条件は両者とも, 加速電圧15 kV, ビーム電流12 nA, ビーム径は1 μm以下, ただし斜長石とガラス試料は5ないし10 μmに広げた. 主成分元素の測定に加えて, 前者では塩

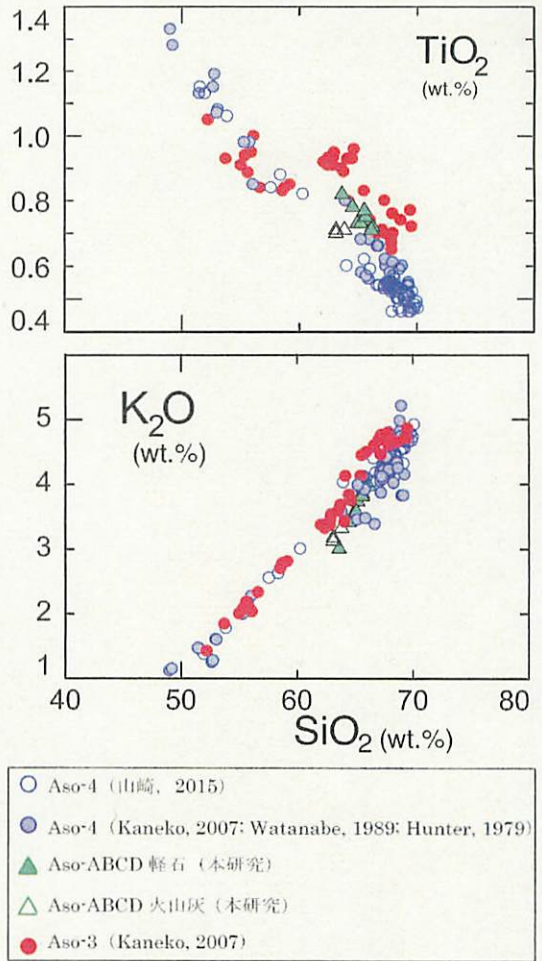


図2 阿蘇A, B, C, Dテフラ(軽石, 火山灰)の全岩化学組成. 阿蘇4^{[9][10][11][12]}, 阿蘇3^[13]のデータを合わせてプロットし, 比較した.

素, 硫黄の分析を行った.

メルト包有物, 石基ガラスの含水量は東京大学地震研究所の真空型顕微赤外FT-IR分光光度計システム(日本分光製FT/IR-660plus, IRT-30V)を使用し, 反射分光法で行った^[7, 8]. 測定は研磨試料の15 μm×15 μm以上の領域で行った.

3. 阿蘇ABCDテフラの化学組成

阿蘇ABCDテフラの斑晶鉱物組合せは, 斜長石, 単斜輝石, 斜方輝石, 鉄チタン酸化物(磁鉄

鉍、イルメナイト)であった。阿蘇4に通常みられる普通角閃石は含まれない。

阿蘇A, C, Dの軽石および阿蘇Bの火山灰の全岩化学組成はデイサイト ($\text{SiO}_2 = 63\text{-}66 \text{ wt.}\%$) であった(図2)。阿蘇4(同 $68\text{-}70 \text{ wt.}\%$) 阿蘇3(同 $65\text{-}67 \text{ wt.}\%$) と比べるとややシリカに乏しい。出版された阿蘇3テフラ、阿蘇4テフラの全岩化学分析値のトレンドを比較すると、前者は後者より鉄、チタン、カリウムが多いという特徴が見られる。今回分析した阿蘇ABCDテフラを両者と比較すると、鉄チタンは阿蘇3組成に近いが、カリウムでは十分な識別はできなかった(図2)。

阿蘇A, C, Dテフラの軽石中の斜長石や輝石に含まれるメルト包有物組成は $\text{SiO}_2 = 70\text{-}72 \text{ wt.}\%$ に集中した(図3)。斜長石、輝石の異なるホストの包有物間に大きな組成の違いは認められなかった。またメルト包有物のガラス組成は、石基ガラスの組成とほぼ同じであった。テフラ層A, C, D間の違いを見ると、メルト包有物の組成が上部に向かってわずかにシリカに富み、マグネシウムが減少する傾向があるが、全体として顕著な違いは認められなかった。従って、本稿では、阿蘇ABCDテフラ中のメルト包有物組成として、一括して取り扱うことにする。

阿蘇ABCDテフラのメルト包有物組成を広域テフラとして記載、分析された阿蘇3^[13]、阿蘇4^[5]、阿蘇ABCD^[4]の火山ガラス組成と比較した。今回分析した阿蘇ABCDテフラのメルト包有物および石基ガラス組成は長橋・他^[4]が報告した阿蘇ABCDテフラの火山ガラス組成とほぼ同じであったが、シリカに富むもの、ばらつくものが目立った。阿蘇3テフラ、阿蘇4テフラの火山ガラス組成の公表値を比較すると、前者は後者より鉄、チタン、カリウムが多いという特徴が見られる。この特徴は上述した軽石の全岩化学組成で見られる特徴と同じである。今回分析した阿蘇ABCDテフラのメルト包有物組成を両者と比較すると、鉄チタンは全岩組成の場合と同様、阿蘇3組成に近いことがわかった。

火砕流堆積物中の火山ガラス組成を比較した場

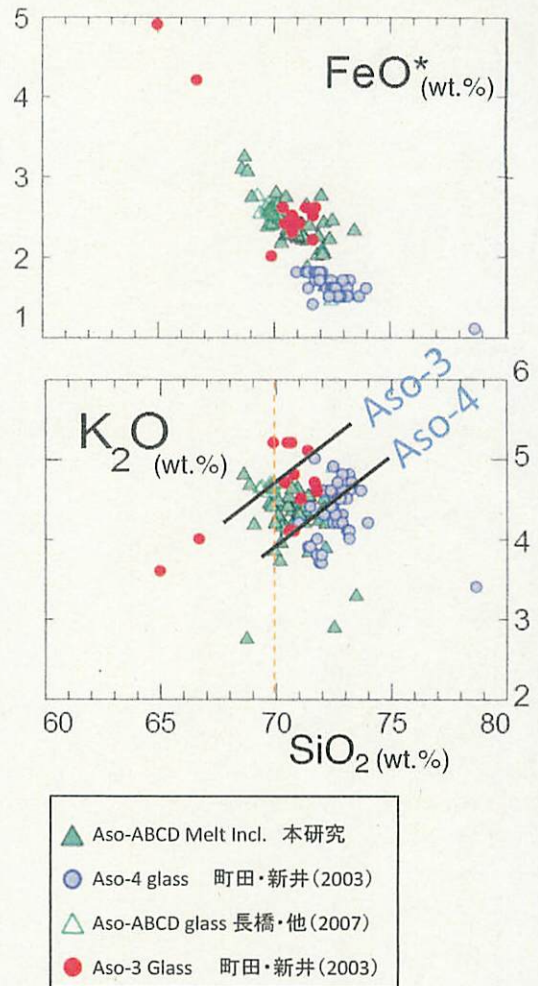


図3 阿蘇A, C, D軽石中の輝石、斜長石に含まれるメルト包有物の化学組成。阿蘇4、阿蘇ABCD、阿蘇3テフラの火山ガラス組成^{[10][11][13]}を合わせてプロットして、比較した。FeO* = 全鉄をFeOで換算したもの。

合、阿蘇2、阿蘇3、阿蘇4の順にKレベル(同じシリカ含有量における K_2O 含有量の値)が下がっていくことが知られている^[14]。阿蘇3と阿蘇4火山ガラスのKレベルを図3に示したが、今回分析した阿蘇ABCDの火山ガラスの多くは阿蘇4より高く、阿蘇3に近いKレベルを示した。

FT-IRによって測定した阿蘇A, C, Dのメルト包有物の含水量は2-3 wt.%のものが多かった(図

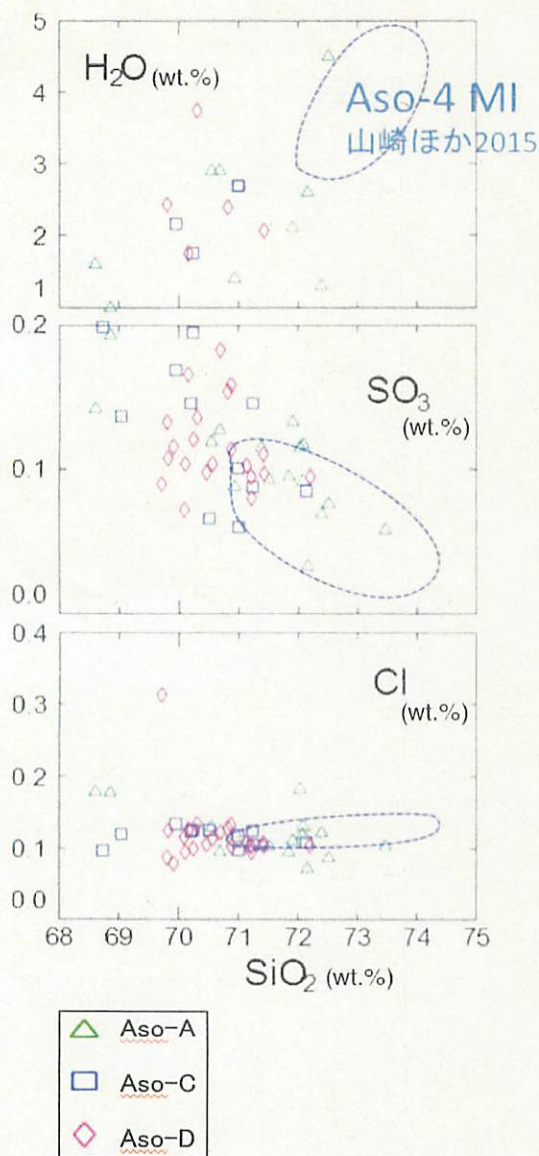


図4 阿蘇A, C, Dテフラのメルト包有物の揮発性成分の含有量. 阿蘇4テフラのメルト包有物の組成領域^[9]を比較のために点線で図示した.

4). 全岩化学組成. メルト包有物組成で比較した結果と同様. 阿蘇A, C, Dの間で大きな違いは認められなかった. これらに対して阿蘇4火砕流堆積物の斜長石, 斜方輝石に含まれるメルト包有物

は3-5 wt.%であった^[9]. もっとも初期の肥猪(こえい)サブユニットが4-5 wt.%, その次の小谷(おやつ)サブユニットが3-4 wt.%である^[9].

メルト包有物中の硫黄含有量はSiO₂に対して減少する. 最上部の阿蘇Aテフラは硫黄含有量が少ないものが目立つ. 阿蘇A, C, Dテフラのメルト包有物の硫黄含有量は阿蘇4のものと明瞭に異なり, 多いことがわかる. メルト包有物中の塩素含有量はほぼ一定の値を示し, A, C, D間, 阿蘇4との比較において違いは認められなかった.

4. 阿蘇ABCDテフラの鉱物組成, 温度圧力の推定

阿蘇ACDテフラに含まれる斑晶鉱物の組成についてはユニット間の違いはなく, 全体として阿蘇3との類似点が目立った. 斜長石斑晶のコアとリムはAn45付近の値が多く, コアはAn65までの幅広い組成を持つ (An=Ca/(Na+Ca)). 阿蘇3のガラスに富む軽石およびスコリアの斜長石コアとリムも同様にAn45にピークを持つユニモダルな組成分布を持ち, スコリアはAn60に弱いピークを持つ^[13]. これらに対して阿蘇4テフラは全く異なる斜長石組成を示す. 初期の肥猪サブユニットの斜長石斑晶のコアとリムはAn35にピークを持つユニモダル分布である. 阿蘇4の大部分を占める小谷, 八女サブユニットのコア・リムはAn35とAn45にピークを持つバイモダル分布. スコリアが卓越する弁利ユニットのスコリアは斜長石斑晶のコアとリムのピークがAn90にある^[9].

共存する単斜輝石と斜方輝石のMg# (=Mg/(Mg+Fe²⁺))を検討したところ, 平衡値からはずれる場合が多かった. 単斜輝石と斜方輝石の起源が異なる可能性が考えられる.

単斜輝石とメルト包有物のペアから単斜輝石温度計^[15]で平衡温度を求めたところ, 860-950°Cの値が得られた. 阿蘇ABCDには普通角閃石が出現しないことを考えると妥当な温度だと考えられる. 単斜輝石とメルト包有物のペアにメルトの含水量(1.3~4.5 wt.%)を入れて単斜輝石圧力計^[15]で圧力を求めたところ, 1.1-2.7 kb (約3-9km)の

値が得られた。現在の阿蘇中岳のマグマ溜りや、約3万年前の始良カルデラのマグマ溜りが地下6kmに推定されている^[16, 17]ことを考えるとほぼ同じ圧力推定値である。

5. 阿蘇カルデラのマグマ供給系の変遷

約12万年前の阿蘇3火砕噴火（噴出物体積150 km³以上）と約9万年前の阿蘇4火砕噴火（噴出物体積600 km³以上）は、ともに火山爆発指数（VEI, Volcanic Explosivity Index）が7の巨大噴火である。これらの巨大噴火間に、VEI=5の阿蘇ABCD（3.5 km³）、大峰火山-高遊原溶岩流（2.0 km³）の活動が起こった。二者のうち、カルデラ内に噴出源が推定される^[3]阿蘇ABCDテフラはカルデラ噴火を起こすマグマ供給系の情報を探求する上で、より重要な位置を占める。

全岩化学組成、メルト包有物組成、鉍物組成でみてきたように阿蘇ABCDテフラは、阿蘇3火砕流堆積物の特徴をより多く有している。従って、阿蘇4噴火の準備過程と考えるよりは、阿蘇3マグマの残存物の噴火と考える方が自然である。600 km³以上も噴出した阿蘇4マグマ溜りが当時準備されていなかったかどうか、今回得られたデータだけで判断するのは難しい。阿蘇4火砕流堆積物に見られる玄武岩マグマの注入は定期的起こっていたと考えられるので、熱的な影響は否定できない。

約3万年前の始良火砕噴火のケースでは、ほぼ同じ組成のマグマが6万年前の岩戸火砕流堆積物の珪長質成分、および始良噴火の5500～2000年前の大塚、深港、毛梨野テフラとして噴出している^[18]。始良火砕噴火後の桜島のステージになると異なった組成の珪長質マグマの活動が卓越し^[18]、始良火砕噴火と類似のマグマの活動は1回しか起こっていない^[19]。すなわち巨大噴火を引き起こした珪長質マグマの準備が、巨大噴火のかなり前から始まっているのに対して、巨大噴火後には異なった組成の珪長質マグマの活動が始まっている。今回の分析結果で明らかになった阿蘇3～阿蘇4のマグマ供給系では、巨大噴火を起こした珪

長質マグマが前駆噴火の噴出物中に認められなかったため、始良とは異なったマグマ供給系モデルを考える必要がある。

6. おわりに

阿蘇4噴火の9000年前に噴出した阿蘇ABCDテフラの全岩化学組成、鉍物組成、メルト包有物組成は、阿蘇4マグマでなく、その前の阿蘇3マグマの特徴をより多く有していた。阿蘇4直前の大峰火山噴火がカルデラ外であるのに対して、阿蘇ABCD噴火はカルデラ内起源である。この時期にカルデラ直下に阿蘇4と類似のマグマが存在しなかったことは、その後の阿蘇4巨大噴火のマグマ溜りの準備過程を考える上で大きな時間的制約になると思われる。

謝辞 本研究プロジェクトを遂行するにあたって、発表、討論の機会を作ってくださった福岡大学、奥野充教授、はじめ国際火山噴火史情報研究集会のメンバーおよび関係者の皆様に感謝します。メルト包有物の分析は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助をうけて行いました。また熊本大学理学部地球環境科学教室のSEM-EDS使用に関して西山忠男教授、磯部博志教授のお世話になりました。以上の皆様に感謝します。本研究には日本学術振興会の科学研究費補助金・基盤研究(C)課題番号：25400491（代表：長谷中）および西日本技術開発（株）の奨学寄付金の一部を使用しました。

参考文献

- [1] 松本哲一 (1996)：若い火山岩のK-Ar年代測定－初生比補正とその応用例－。地質ニュース, 501, 12-17.
- [2] 椎原航介・長谷中利昭・安田敦・外西奈津美・森康 (2017)：阿蘇4火砕噴火直前に噴出した大峰火山：メルト包有物組成からみるマグマ供給系の変遷。月刊地球, 本特集号.
- [3] 小野晃司・松本禮夫・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図幅), 地質調査所, 145p.
- [4] 長橋良隆・佐藤孝子・竹下欣・田原敬治・公文富士夫 (2007)：長野県, 高野層ポーリングコア (TKN-2004) に挟在する広域テフラ層の層序と編年。第四紀研究, 46,

305-325.

- [5] 町田洋・新井房夫 (2003) : 火山灰アトラス [日本列島とその周辺], 東京大学出版会, 336p.
- [6] 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 Museum of Natural History and Human History - Ser. A, 3, 1-12.
- [7] 安田敦 (2011) : 顕微FT-IR反射分光法による斑晶ガラス包有物の含水量測定, 火山, 56, 41-49.
- [8] Yasuda, A. (2014) : A new technique using FT-IR microreflectance spectroscopy for measurement of water concentrations in melt inclusions. Earth Planet Space, 66, doi:10.1186/1880-5981-66-34.
- [9] 山崎秀人・長谷中利昭・安田敦 (2015) : 斜長石およびメルト包有物組成からみた阿蘇-4 火砕流マグマ溜りの層構造, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会 要旨.
- [10] 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.
- [11] 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., 27, 97-120.
- [12] 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.
- [13] Kaneko, K., Inoue, K., Koyaguchi, T., Yoshikawa, M., Shibata, T., Takahashi, T. and Furukawa, K. (2015) : Magma plumbing system of the Aso-3 large pyroclastic eruption cycle at Aso volcano, Southwest Japan: Petrological constraint on the formation of a compositionally stratified magma chamber. J. Volcanol. Geotherm. Res., 303, 41-58.
- [14] 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研究, 月刊地球, 28, 2-6.
- [15] Putirka, K. D. (2008) : Thermometers and barometers for volcanic systems. Reviews in Mineralogy and Geochemistry 69, 61-120.
- [16] 須藤靖明・筒井智樹・中坊真・吉川美由紀・吉川慎・井上寛之 (2006) : 阿蘇火山の地盤変動とマグマ溜まり-長期間の変動と圧力源の位置-火山, 51, 291-309.
- [17] 安田敦・吉本充宏・藤井敏嗣 (2015) : 始良火砕噴火のマグマ溜まり深度. 火山, 60, 381-397.
- [18] 関口悠子・長谷中利昭・森康 (2014) : 始良カルデラ火山に見られる 3 回のマグマ活動サイクル, 月刊地球, 36, 303-309.
- [19] 小林哲夫・味喜大介・佐々木寿・井口正人・山元孝広・宇都浩三 (2013) : 桜島火山地質図, 第 2 版, 1 : 25000, 産業技術総合研究所 地質調査総合センター.

☐