

桜島昭和火口噴出物の連続サンプリングによる活動監視

嶋野岳人*・横尾亮彦**,***・井口正人**・味喜大介**

* 富士常葉大学環境防災研究科

** 京都大学防災研究所

*** 現所属：東北大学大学院理学研究科

1. はじめに

桜島火山は日本国内で最も活発な火山活動を続ける火山の1つである。歴史時代には、天平宝字、文明、安永、大正と比較的規模の大きい噴火があり、溶岩流出やプリニー式噴火をしている。一方、これらの大規模な噴火の間には、休止期を挟みつつ最近半世紀にわたる南岳火口でのブルカノ式噴火のような活動を行ってきたと考えられる。これらの大規模・小規模噴火の相互関係の理解は、長期・短期に限らず、防災対策や活動予測を行う上で必須のことであるが、必ずしも明らかではないことが多い。

約半世紀にわたって活発であった南岳火口は1990年代から静穏化傾向にあったが、2006年からは、昭和噴火以来静穏であった昭和火口が58年ぶりに活発化した（井口ほか，2008）。今のところ小規模な灰放出を中心とする活動に留まっているが、礫サイズの噴出物が山麓まで達する噴火も増加し、着実に爆発頻度は高まっている。2010年2月現在も衰えることなく高い活動状態を維持しており、今後、更なる活発化が懸念されている。特に、これまで3年間の推移はより大規模な溶岩流出に発展した昭和噴火（鹿児島測候所，1940,1951）と似ており、今後の活動を事前にどの程度予測することができるのか、火山学的興味のみならず、防災面においても重要な課題である。

これまで桜島火山の活動評価は、地球物理学的手法に基づく連続モニタリングによって行われ、マグマの蓄積・移動量、深度等の推定や爆発メカニズムの理解につながる成果が得られている（Tameguri et al., 2002; Iguchi et al., 2008 など）。また、火山ガス観測についても近年連続的な観測手法が確立されつつある（森ほか，2008 など）。これらの連続観測による活動的火山の研究によれば、桜島火山（昭和火口の活動も含む）の活動は広い意味ではブルカノ式～ストロンボリ式噴火を一貫して行っているとの説

明が可能であり、それらをできるだけシンプルかつ統一的に説明すべく噴火メカニズムの研究が進められている。しかしまた、その一方で、これらの観測結果の多くは、時々刻々と変化する噴火現象には二度として同じ現象の再現はないことを示している（たとえば、何年何月何日の噴火と言った現象に限って議論せざるを得ないケースがある）。これらの個々の事象については全く偶発的なもの（たとえば新たなマグマの供給や火道の閉塞など）によるケースも含まれるかもしれないが、このような噴火の推移の予測をするためには、そのような非一貫性を生むメカニズムについても理解することが、これらの活動推移の理解、予測には必須であろう。

現在、上記の地球物理学的観測あるいは火山ガス観測によるデータに対し、マグマの直接的な情報である噴出量、噴出物の化学組成や温度などの情報は希少で、連続的解析に至ってはほとんど行われていない。しかし、多くの噴火現象の原動力がマグマの移動や熱放出、脱ガスなのであるから、噴火の推移を探るためにマグマやその固結した噴出物を採取して連続観測を行うことはむしろ当然の方法であろう。本研究では、筆者らがこれまでに開発した自動火山灰採取装置によって噴出物を連続採取し、マグマの時系列的な変化と表面現象の関係を明らかにすることを目標にしている。本稿では、これまでに得られた解析結果について紹介する。なお、化学組成分析については現在も解析を継続中であり、ここでは速報的に概要を報告するものである。

2. 観測手法・解析手法

本研究で用いている自動火山灰採取装置（Fig. 1）では、電池駆動により30試料分の降下火山灰を任意の時間間隔で続けて採取することが可能であり、無電源地域、風雨などの悪天候下、火山地域のように火山ガスや火山灰の存在する極限環境においても長



Fig. 1 桜島南西有村川における自動火山灰採取装置の設置状況および装置内部の構造。上段：左から順に、設置状況、コントローラ接続状態、内部試料ホルダー装着状態。下段：左から順に、有村での設置状況、観測点位置、回収直後の試料、装置に内蔵した温湿度大気圧計とその測定結果。

期間無人での試料採取が可能となっている。また、軽量化を行っており、一人でも人力での運搬が可能であるため、交通手段の限られた火口近傍での観測や突発的に発生した噴火などにも対応することができる。桜島では、試験観測を2006年2月から開始し、上記の課題を解決した上で連続観測体制を確立したのは2008年2月以降である。現装置は2台作製し、桜島火山北麓の高免 (Fig. 2 のKOM)、南麓の有村川 (同ARI) で2008年2月より稼働させていたが、高免に設置した1台は同年10月に故障のため停止し、翌年5月末から北岳山頂の北東約2kmに移動し観測を再開した (同AMD)。しかし、本地点がダム工事に入ったため再度観測を停止し (2009年11月)、現在は有村川でのみ稼働中である。

本研究では24時間間隔でおおよそ1ヶ月毎に試料を回収し、実験室において乾燥・秤量後、実体鏡下で観察を行っている。また、試料薄片を作製し、偏光顕微鏡による含有鉱物の同定、岩石組織の観察、石基ガラスの化学組成等の分析・解析を行っている。石基ガラスの化学組成については、東京大学地震研究所のEPMA (JEOL社製8800R型) を使用し、嶋野ほか (2005) と同様の方法で分析を行った。

3. 採取火山灰量

Fig. 3に有村観測点 (Fig. 2のARI) における火山灰の採取量 (乾燥重量) を示した。連続観測を開始した2008年2月から約一年間は比較的降灰量が少なく、一日あたりの降灰量もほぼ一定していた。しかし、2009年2月以降、比較的降灰量の多い (1g以上; 1m³あたりで50g程度以上) 日数が増加し、これに伴って平均的な日別降灰量の増加が認められた。この結

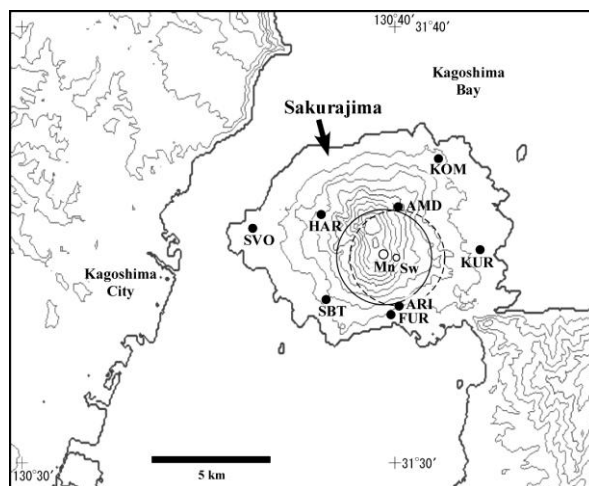


Fig. 2 火山灰試料採取地点。実線、破線の円はそれぞれ南岳 (Mn)、昭和火口 (Sw) から2kmの範囲を示している。

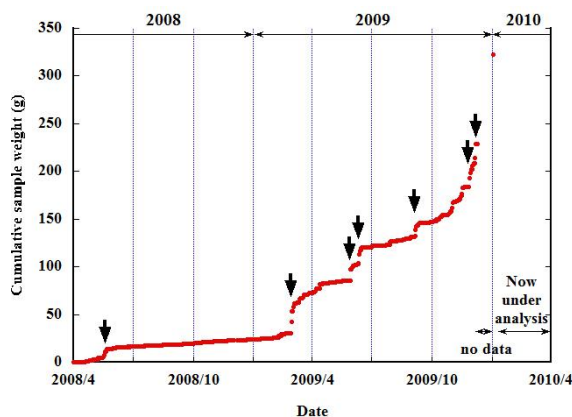


Fig. 3 有村観測点 (Fig. 2のARI) における2008年4月から2010年1月までの積算降灰量 (2009年12月の日別量は欠測、2010年は分析中)。2008年より2009年の採取率が1桁ほど大きく、数回の比較的大規模な降灰 (矢印) の寄与が大きい。

果は、あくまで1観測点におけるものであり、噴火活動そのものを反映した変動であると直ちに結論づけることはできない。特に、桜島上空では季節ごとに卓越風向のあることが知られているが、採取量が日別等のより短期の風向変動を強く反映させたものである可能性も考えられる。しかし2008年と2009年における同じ季節でも明らかに降灰量の増加が認められ、鹿児島気象台における日別風向（9時と21時）と採取量には、北東方向の風の場合（約45°）に採取量が少ないことを除けば、観測されている範囲の降灰量については風向による顕著な違いは認められない（Fig. 4）。また、全く別の方法で観測・推定した噴出量（Tajima et al., 2010; 京都大学防災研究所, 2010）でも2009年にかけて同様の増加傾向が認められていることから、定性的には火口における噴出量を反映しているものと考えられる。

4. 火山灰粒子の岩石学的特徴

火山灰の24時間毎のサンプリングは2008年2月から行っており、2009年12月初めまでは概ね1週間以上の欠測もなく継続採取に成功した。しかし、試料の解析はまだ終了していないため、ここでは、2009年2月から11月のうち、すでに解析を行った時期の試料について述べる。

この期間に採取した火山灰はいずれも新鮮な粒子だけでなく、赤色酸化ないし硫黄変質を被った溶岩片や遊離結晶等を様々な割合で含んでいる（Fig. 5a）。

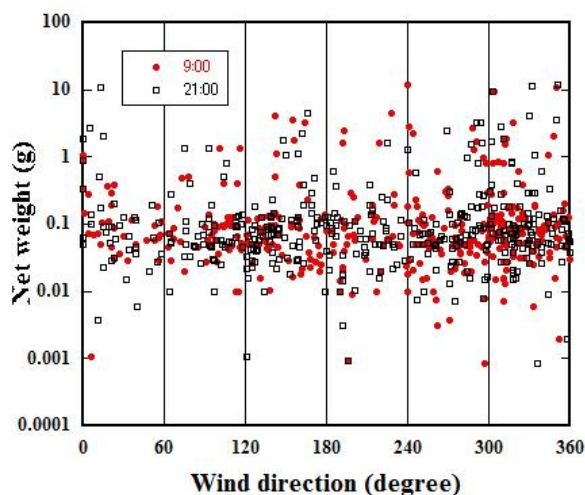


Fig. 4 有村観測点（Fig. 2のARI）での2008年4月～2009年8月の火山灰採取量と鹿児島気象台上空（900 hPa）での風向（気象庁, 2009）。昭和火口は有村観測点のほぼ真北にある（約360°）。

また、比較的新鮮な粒子にもさまざまな結晶度のものが存在し、発泡したものも含まれることがある。

ガラス質の粒子の多くはおもに針状の斜長石、針状～燕尾状および粒状の単斜輝石を石基鉱物として含む（Fig. 5c）が、ほとんど石基結晶がなく発泡組織の顕著な粒子も少数存在する（Fig. 5d）。一方、結晶質の粒子は斜長石、単斜輝石に加えて鉄チタン酸化鉱物を含み、粒間にはガラスやシリカ鉱物が認められる（Fig. 5b）。このほか、結晶度が高いもの

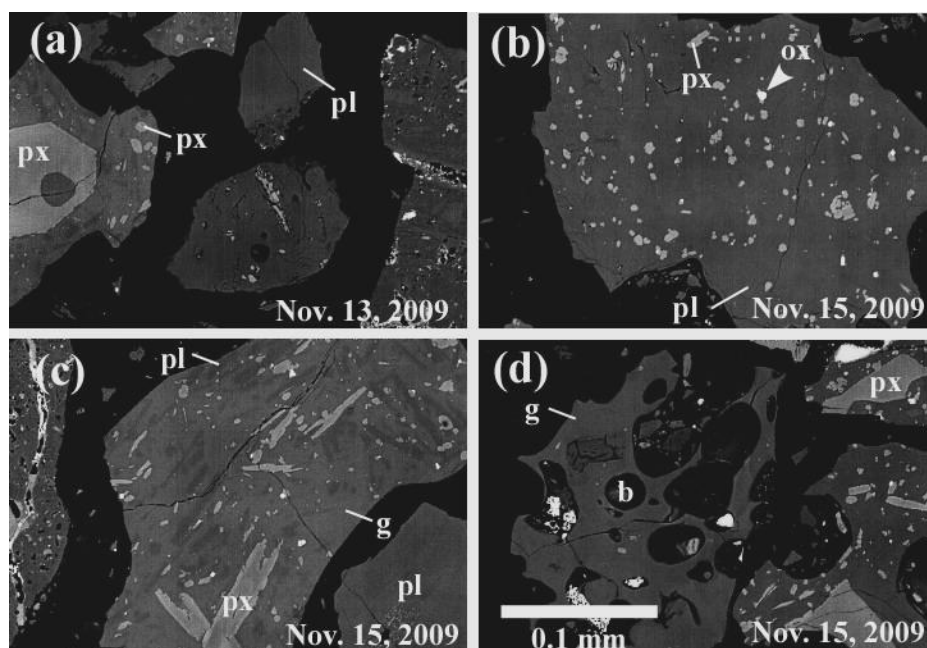


Fig. 5 桜島2009年11月の火山灰粒子のSEM像。いずれも横幅は約0.28 mm。pl: 斜長石、px: 単斜輝石、ox: 鉄チタン酸化鉱物、g: ガラス、b: 気泡。(a) 11月13日の火山灰粒子。(b)～(d) 11月15日の火山灰粒子。石基結晶度の異なる様々な粒子が含まれている。(c) 発泡度の高い粒子は多くても1割未満である。

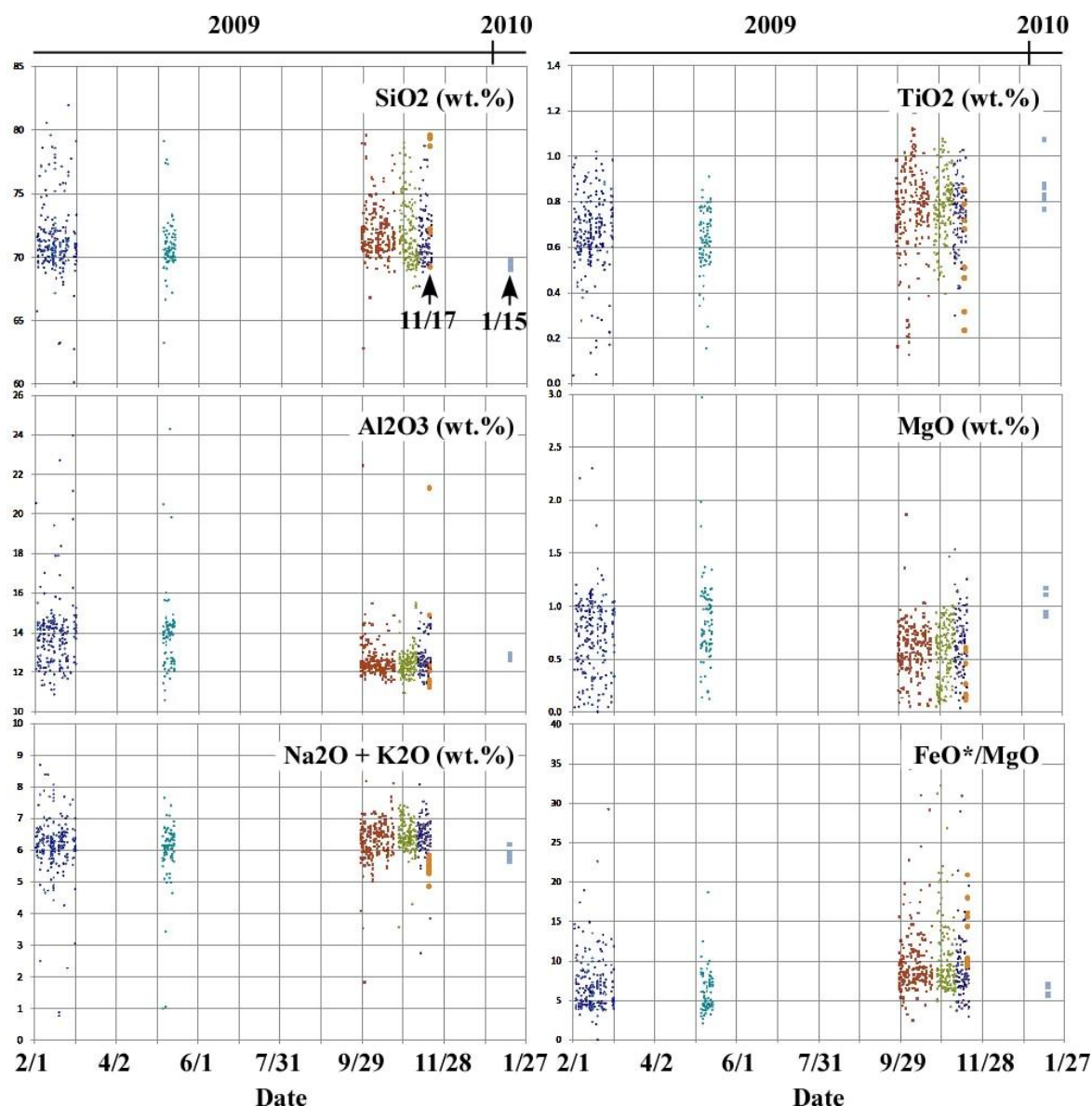


Fig. 6 石基ガラス組成の日別変動（横軸は2009年2月から2010年1月末）。およそ1ヶ月間隔の回収日毎に色分けしている。矢印で示した日付の試料は礫サイズの溶岩片および軽石。プロットのない期間については未解析（試料はあり）。期間を通して、大きな変化は認められないが、組成幅や上下限值および集中度については若干の変動が認められる。

の、結晶の輪郭が丸く、一部にガラスが集中し発泡し、再溶融したような組織を持つ粒子も存在する。以上のいずれの粒子タイプにも、斑晶として斜長石や単斜輝石、斜方輝石が含まれるものがあり、まれに鉄チタン酸化鉱物やかんらん石が認められることもある。遊離結晶はこれらの斑晶と同様の鉱物からなり、多くは破断面に囲まれた形状を呈している。

5. 石基ガラス組成の日別変化

石基ガラス組成の日別変化はFig. 6 に示したとおりである。まず、全期間を通してみると、1試料（1日分）に含まれる火山灰粒子タイプのバリエーショ

ンに由来する石基ガラスの組成幅に比べると、その日別変動はあまり顕著ではない。また、これらのガラス組成と前節で述べた火山灰粒子の石基結晶度・組織の違いとは系統的な対応関係は認められず、同様の結晶組織であってもガラス組成が異なる場合、全く異なるガラス組成でも比較的良好に似た石基組織を示す場合などがある。

しかし、プロットの集中度や上・下限値を見ると僅かではあるが日別変化が認められる。例えば、Al₂O₃についてみると、2009年2月および5月では12 wt.% および14 wt.% 付近に化学組成が集中しているのに対して、9月末以降では12 wt.% 付近の一方に強く集中している。MgOでも、2009年2月および5月

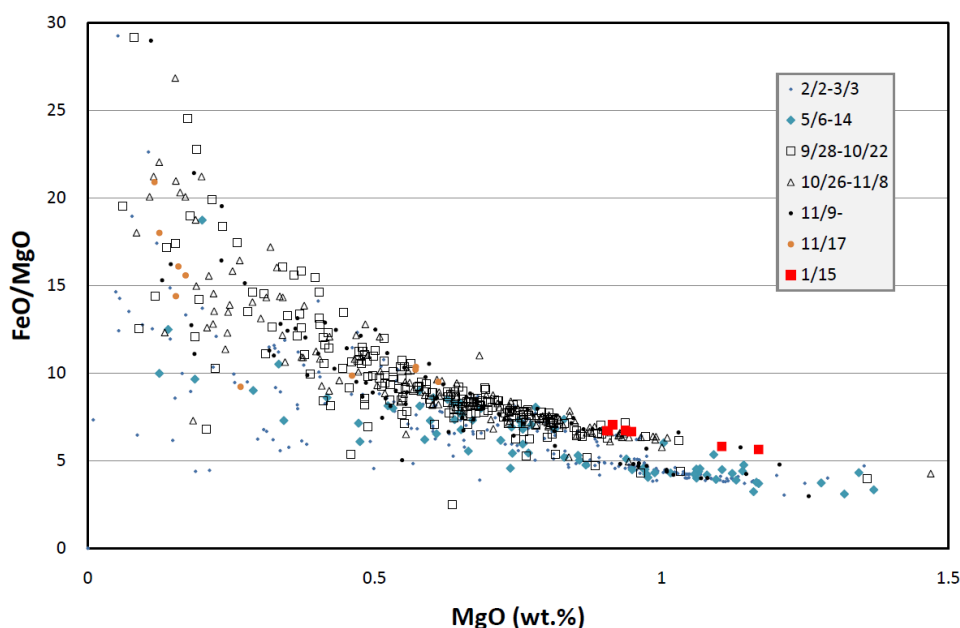


Fig. 7 2009年2月2日～3月3日、5月6日～14日、9月28日～10月22日、10月26日～11月18日における降下火山灰試料の石基ガラス組成。11月17日の礫サイズの緻密岩片・スコリア、2010年1月15日の軽石の石基ガラス組成も示してある。FeO*/MgOの異なる2つのトレンドが認められる。2月および5月では低FeO*/MgOのものが卓越する。9月末から一転して高FeO*/MgOのものが卓越し、低FeO*/MgOのものが消滅するが、11月10日前後から再び低FeO*/MgOのものが出現し始めている。

では1.0 wt.% 付近に集中する点が多いのに対して、9月末以降では0.8 wt.% 付近に強く集中している。また、複数の成分および成分比について組成図を検討すると、ほとんどの成分どうしでは、時系列変化と同様に大きな差異は認められないが、MgO - FeO*/MgO 図ではFeO*/MgOの異なる2つの組成変化トレンドが認められる (Fig. 7)。

6. 考察：マグマ供給系の変化

2009年は4月中旬の小休止を除き、現在に至るまで活発な噴火活動を継続しており、4月末以降では噴火のなかった日は数える程度でしかない (2010年2月現在)。また、2008年秋頃から2009年を通して現在に至るまで、夜間には大隅河川国道事務所の超高感度カメラ監視画像上で火映が頻繁に観察されていることから (横尾ほか, 2010)、高温のマグマが地表付近にまで達していたことが強く示唆される。

マグマの化学組成については、10月初旬以降には、1955年からの南岳活動以来、最もSiO₂に乏しい全岩化学組成を持つ噴出物 (本稿の礫試料と同日の試料) が得られ、新たなマグマの上昇が始まったと考えられている (北海道大学, 2010; 産業技術総合研究所, 2010)。しかし、2009年に入ってから10月以前までの間には全岩組成分析のできる礫サイズの噴出物が得られていないため、2009年のどの時点でこのようなマグマが関与し始めたかについては不明である。

本研究の結果、火山灰粒子の石基ガラス組成にはFeO*/MgOの異なる2つの組成トレンドが認められた。まず、いずれのトレンドをつくる噴出物についても、採取量が数g/日以上の日々の全火山灰試料のかかなりの割合を占める粒子であることから、すべてが南岳山体を構成するような古い溶岩等をたまたま取り込んだようなものとは考えにくい。また、高FeO*/MgO側トレンドの最もMgOに富むものは、結晶度の最も低い2010年1月15日に噴出した礫サイズの軽石のものであり、2009年11月17日の緻密溶岩角礫は同一トレンド上のより低MgO側にプロットされる。したがって、両者はいずれも石基鉱物の晶出によるトレンドであると考えられ、マグマの上昇速度が早く、気泡分離が進行しない場合には石基結晶度の低いマグマが噴出し、上昇速度が遅く、気泡分離が十分進む場合には石基結晶度の高いマグマが噴出しているものと考えられる。

同様に低FeO*/MgO側のトレンドについても石基鉱物の晶出によるものと考えられる。ほとんどが2009年5月以前あるいは11月中旬以降のものであり、全岩組成が最もSiO₂に乏しいマグマの噴出した時期である9月末から11月初めにかけてはほとんど消滅している。

以上の石基ガラス組成とその変化のタイミングについての結果を総合的に解釈すると、全岩化学組成が不明のため、親マグマが異なるのか、斑晶鉱物の結晶分化経路が異なるのかは区別が付かないが、い

ずれにしても2つのマグマが火道浅部まで交互あるいは同時期に上昇しており、2009年9月末までは低FeO*/MgO側トレンドのマグマ、それ以降には高FeO*/MgO側トレンドのマグマの上昇が卓越し、それぞれ稼働先負での石基の結晶かを経験して噴出したと考えられる。今後、地球物理学的データの対比を行って、これらのマグマの上昇メカニズムやそのタイミングに制約条件を与えていきたい。

7. おわりに

2006年6月4日に58年ぶりに再開した桜島昭和火口の噴火活動は、噴火活動休止期をはさみながらも、確実に活発化しつつ継続しており、今後の活動傾向の変化をいち早く検知する方法を見出すことが喫緊の課題である。本稿では2009年に連続採取した火山灰の解析からマグマ供給系の日別変化を読み取る試みを行った。現段階では、未測定の見本がたくさんあること、様々な構成粒子がある中で必ずしも全ての粒子タイプについて分析していないこと、各粒子構成率の測定を行っていないこと、などから、6.での解釈は様々な不確定要素を持つ予察的なものといわざるを得ない。また、どのようなデータがマグマの活動度の目安・指標となるのかについても不明のままである。今後、上記の解析を進めると同時に、これまでに得られている火口・噴煙映像記録やその他の地球物理学的時系列データと比較を行うことによって、より多角的に検証し、マグマ供給系の時間変化を生むメカニズムの理解につなげていく必要がある。

謝 辞

本研究で行った桜島での降下火山灰の採取は、京都大学防災研究所附属火山活動研究センター、石原和弘氏をはじめとする同センター職員諸氏による支援を受けて実施した。自動火山灰採取装置の立案・設計・作製からトラブル対応までの全般については、東北大学理学部技術部の方々ならびに同理学研究科の西村太志氏のご厚意によるところが極めて大きい。2010年1月に噴出した軽石は産業技術総合研究所の下司信夫氏に提供して頂いた。また、石基ガラスの化学分析については地震研究所の安田敦氏にお世話になった。この場を借りてお礼申し上げます。なお、本研究の一部には、科研費補助金（No. 18740332, 代表：嶋野岳人；No. 20310104, 代表：井口正人）、平成21年度京大防災研一般共同研究（代表：嶋野岳人）経費を使用した。

参考文献

- 北海道大学（2010）桜島火山2009年11月17日噴火のマグマの特徴：2006年からの噴出物の物質科学的検討。第115回火山噴火予知連絡会資料。
- 井口正人・為栗 健・横尾亮彦（2008）火山活動の経過－1997～2007年－。第10回桜島火山の集中総合観測, 1-18.
- Iguchi, M., Yakiwara, H., Tameguri, T., Hendrasto, M. and Hirabayashi, J. (2008) Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 178, 1-9.
- 鹿児島測候所（1940）昭和14年10月～11月櫻島噴火報告。験震時報, 11, 99-119.
- 鹿児島測候所（1951）1946年3月～5月櫻島噴火報告。験震時報, 15, 42-51.
- 気象庁（2009）過去の気象データ検索（高層）。
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/upper/index.php>
- 京都大学防災研究所（2010）南岳山頂下へのマグマ供給量の見積もり。第115回火山噴火予知連絡会資料。
- 森俊哉・影澤博明・平林順一・山本圭吾・味喜大介・横尾亮彦・風早康平・森健彦・大和田道子・篠原宏志・斉藤元治・安原正也（2008）最近10年間の二酸化イオウ放出率の推移。第10回桜島火山の集中総合観測, 137-142.
- 産業技術総合研究所（2010）桜島南岳昭和火口から2010年1月15日夕～16日朝にかけて噴出した軽石。第115回火山噴火予知連絡会資料。
- 嶋野岳人・飯田晃子・吉本充宏・安田 敦・中田節也（2005）浅間火山2004年噴火噴出物の岩石学的検討。火山, 50, 315-332.
- Tajima, Y., Shimomura, S., Tamura, K., Yamakoshi, T., Takezawa, N., Tsune, A. and Tsurumoto, S. (2010) "Ellipse approximation isopach method for prompt recognition of ash fall distribution: A case study at Sakurajima Volcano, *Jour. Volcanol. Geotherm. Res.* (submitted).
- Tameguri, T., Iguchi, M. and Ishihara, K. (2002) Mechanism of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima volcano, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, 47, 197-215.
- 横尾亮彦・井口正人・為栗健・園田忠臣（2010）2010年までの桜島昭和火口の噴火活動について。平成21年度京都大学防災研究所一般共同研究報告書（本報告書）, 3-16.

Petrological Monitoring of Showa Crater by Time Series Sampling of Ash at Sakurajima Volcano

Taketo SHIMANO^{*}, Akihiko YOKOO^{**,***}, Masato IGUCHI^{**} and Daisuke MIKI^{**}

^{*}Fuji Tokoha Univ., ^{**}DPRI, Kyoto Univ., ^{***}Present address: Tohoku Univ.

Synopsis

Ash samples have been collected continuously at Sakurajima Volcano for about two years since February 2008 by developing automatic ash sampling system. The amount of sample collected everyday is relatively consistent with those measured by isopach methods and shows that the average accumulation rate of 2009 is by one order in magnitude higher than that of 2008 due to increase in the number of bigger eruptions. All samples consist of various types of particles in terms of colors, textures, and mineral assemblages, and simple classification is not applicable. However, there seems to be two types of magmas; those with high- and low-FeO*/MgO chemical trends, in terms of matrix glass composition. Both variation trends would reflect crystallization paths of microlites in shallow plumbing system of this volcano because crystallinity increases with decrease in MgO. The time-series change in matrix glass composition of 2009 eruption would have been generated by alternation of injection of the two magmas from depth. The difference of the two magmas in FeO*/MgO might have resulted from differences in crystallization history of phenocrysts or in initial magma at depth.

Keywords: Sakurajima volcano, petrological monitoring, volcanic ash