

ブルカノ式噴火研究の現在地

三輪 学央*

(2015年12月24日受付, 2016年3月2日受理)

The Present Position of the Study of Vulcanian Eruption

Takahiro Miwa*

1. はじめに

火山噴火は地球上で見られる最もダイナミックな自然現象の一つであり、そのメカニズムを理解することは科学的に興味深い課題である。また、そのメカニズムの定性的・定量的な理解は、防災・減災へ適切な指針を与えようという観点からも極めて重要である。

表面現象として火山噴火が観察されるとき、或いは観察される前、地下ではマグマが火道を通っている。火道を通るマグマは地下から地表への道中で、減圧・発泡・脱ガス・結晶化といった様々な物理過程を経験し、その結果が噴火の表面現象の多様性（規模・強度・様式など）として表れる（*e.g.*, Eichelberger *et al.* 1986）。上昇するマグマは減圧、発泡することによって密度の低下を引き起こし、さらなる上昇が促される。一方で、脱ガスや結晶化はマグマ密度や粘性の増加を通してマグマ上昇を妨げる。火山噴火現象のメカニズムを知ることは、このような地下で流れるマグマの実態を理解することに他ならないが、噴火中の火道を通るマグマを直接観察するのは不可能である。そこで我々は、火山噴火物採取・解析し、その岩石組織や化学的特徴からマグマ上昇過程を間接的に推測してきた。特に、マグマの減圧・脱水・発泡・脱ガスに伴って形成される気泡やマイクロライト（石基結晶）に関する噴火物組織解析と、岩石組織形成に関する実験的・理論的研究が組み合わさって、天然のマグマ上昇過程を明らかにする試みが進展してきた（*e.g.*, Cashman, 1992; Toramaru *et al.*, 2008; Brugger and Hammer, 2010）。

著者はこれまで、桜島火山のブルカノ式噴火による噴火物について、その組織解析からマグマ上昇過程の推定を行ってきた。今回、これまでの研究を日本火山学会研

究奨励賞という形で評価していただき、その内容を解説・紹介する機会を頂いた。本稿では、著者による桜島火山の研究を紹介しつつ、現時点で得られているブルカノ式噴火に関する理解をまとめていく。まず、第2章ではブルカノ式噴火の一般的特徴を説明する。第3章ではブルカノ式噴火のメカニズムを蓋形成過程や減圧過程の観点から論ずる。第4章ではブルカノ式噴火の中長期的活動、すなわちブルカノ式噴火が繰り返し発生する場合の噴出物の特徴や、その特徴を抽出するための手法を論じる。そして、第5章では本稿のまとめと、ブルカノ式噴火に関する今後の展望について簡単に述べる。

2. なぜブルカノ式噴火なのか

火山噴火メカニズムを理解する上で、ブルカノ式噴火は「地味」で「起こりやすい」が故に非常に良い研究対象となる。地味さはブルカノ式噴火を火山爆発現象の最もシンプルな形と捉える助けとなる。また、起こりやすさは現象を繰り返し観測することを可能とする。本章では、ブルカノ式噴火の地味さと起こりやすさに着目しつつ、その一般的特徴について説明する。

ブルカノ式噴火は、短い継続時間と小さな噴出量の単発的な爆発として特徴づけられる「地味な」噴火である。ブルカノ式噴火では突発的な爆発に続いて、火砕物と火山ガスからなる噴煙が数秒～数十分程度の継続時間で放出される。この突発的な爆発に伴い衝撃波（空振）が放出され、爆発地震と呼ばれる振幅が比較的大きな低周波地震も励起される（*e.g.*, Self *et al.*, 1979; Iguchi *et al.*, 2008）。このとき放出される火砕物は、数mスケールの火山岩塊などの弾道放出物、あるいは噴煙を主体的に構

* 〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1
国立研究開発法人防災科学技術研究所
National research institute for earth science and disaster

prevention, Tennodai 3-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0006, Japan.
e-mail: miwao@bosai.go.jp

成する火山灰及び火山礫である (e.g., Morrissey and Mastin, 2000). プルカノ式噴火による噴出量は一般的なプリニー式噴火のそれよりも数倍以上小さい。一回のプルカノ式噴火による火砕物の噴出量は、Soufriere Hills 火山で 1996 年 9 月 17 日に発生した比較的大きなイベントでも $10^5 \sim 10^7 \text{ kg}$ 程度と見積もられているのに対し、一般的なプリニー式噴火による噴出量は $10^{11} \sim 10^{15} \text{ kg}$ である (Carey and Sigurdsson, 1989; Robertson *et al.*, 1998). プルカノ式噴火では、その噴出量の少なさに対応するように、噴煙高度は大半が数 km 以下である。噴煙高度が 20 km を越えるようなイベントも知られているが、その発生は稀である (Nairn and Self, 1978; Cassidy *et al.*, 2015).

プルカノ式噴火は一連の活動において、数か月から数年の中長期に渡って爆発を繰り返すことが多い。よく知られているように、桜島火山では 1955 年から現在までプルカノ式噴火を繰り返す活動が断続的に続いている (石原, 2000). このときの噴火発生頻度は様々であるが、例えば昭和火口が活動を始めた 2006 年から 2014 年の間では、約 7,400 回の噴火イベントを観測している (気象庁). このようなプルカノ式噴火の繰り返し活動は、溶岩ドームを形成する噴火や、より爆発的な噴火のクライマックス相の前にもしばしば観察される。雲仙火山 1991-1995 噴火では、溶岩ドーム形成の序盤に複数回のプルカノ式噴火が発生したことが知られている (Nakada *et al.*, 1999). また、Pinatubo 火山の 1991 年噴火ではクライマックス相であるプリニー式噴火の前、50 時間内に 17 回のプルカノ式噴火が発生した (Hoblitt *et al.*, 1996; Hammer *et al.*, 1999). あるいは、霧島新燃岳 2011 年噴火のように、サブプリニー式噴火ステージ終了後の数か月間、プルカノ式噴火が繰り返し発生することもある (Nakada *et al.*, 2013).

3. プルカノ式噴火のメカニズム

この章では、先行研究と著者による研究を織り交ぜながら、プルカノ式噴火のメカニズムを論じる。プルカノ式噴火の普遍的なイメージは、火道浅部でのガスを含んだ高圧源の破裂であろう (Self *et al.*, 1979; Turcotte *et al.*, 1990; Woods, 1995). 高圧源は「蓋」によって大気と隔てられ、この蓋が取り去られることで火道内が急減圧され、火砕物が放出される。この考えに基づくプルカノ式噴火過程は、蓋の除去を挟んで、爆発準備としての蓋形成・増圧過程と、噴出物を放出する爆発・減圧過程の二つに大まかに分けることが出来るだろう。本章では、この区分けに基づいて議論を進めていく。

3-1 蓋形成・増圧過程

プルカノ式噴火の準備過程は火道出口が開放系から閉

鎖系へと変化する過程と言える。ここではプルカノ式噴火活動のサイクルがよく検討されている桜島火山を例にして、この準備過程を論じる。桜島火山ではプルカノ式噴火活動が活発化する前に、しばしば連続的なストロンボリ式噴火が発生する (e.g., Iguchi *et al.*, 2008). このストロンボリ式噴火が発生しているとき、火道出口は開放系となり、深部から未脱ガスマグマが浅部へ供給され、地表へ放出されていると考えられる。この噴火による火山灰はプルカノ式噴火のものと比較して、高発泡度・低結晶度であり、且つ付着成分分析から得られる非水溶性塩素濃度が高い (Nogami *et al.*, 2006; Yamanoi *et al.*, 2008). また、ストロンボリ式噴火に伴う BL 型地震群発と地殻変動の解析は、発泡マグマの浅部への供給と、それに伴う深部での火道収縮を示唆している (立尾・井口, 2009). これに対して、プルカノ式噴火の前には火道出口が閉鎖系になっていると考えられる。プルカノ式噴火の前には山体膨張による地殻変動が観測され、火道浅部で増圧が起きている。また、プルカノ式噴火による噴出物は高密度・低発泡度、且つ揮発性成分に乏しいものであり、マグマが火道浅部で比較的長時間滞在し、噴出を妨げる蓋となっていたことが示唆される (e.g., 大庭・他, 1981; Nogami *et al.*, 2006; Yamanoi *et al.*, 2008; Miwa *et al.*, 2009; Miwa *et al.*, 2013; Miwa and Toramaru, 2013). さらに火山ガス観測からも、プルカノ式噴火発生前に火口からの SO_2 flux が減少することが報告されており、火道出口の閉鎖系への変化を支持する (Yokoo *et al.*, 2013). 以上で紹介したのは桜島火山の例であるが、浅間火山 2004 年噴火でもストロンボリ式噴火から複数回のプルカノ式噴火活動への変化が観察されている (野上・他, 2008). また、火道出口における開放系から閉鎖系への遷移という意味では、霧島新燃岳 2011 年噴火で見られたサブプリニー式噴火ステージからプルカノ式噴火ステージへの遷移も、規模は異なるが似た現象なのかもしれない (Nakada *et al.*, 2013).

火道出口が閉鎖系となるためには、火道内部に蓋の役割をするキャップロックが形成できれば良い。この考えはプルカノ式噴火による噴出物に高密度・低発泡度な噴出物が多く含まれることから支持されている (e.g., Yamagishi and Feebrey, 1994). 火道浅部での増圧過程はマグマ結晶化に伴う発泡、火道浅部でのマグマ粘性増加、発泡マグマの浮力などが考えられてきたが (Sparks, 1997; Stix *et al.*, 1997; Melnik and Sparks, 1999; 竹内・他, 2006; Burgisser *et al.*, 2011), いずれのメカニズムでもキャップロックの構造は重要である。このキャップロックを含めた火道浅部マグマの構造は 2000 年代以降のいくつかの物質科学的研究で議論されており、最上部に低

発泡度・高結晶度なマグマが存在し、その下部には高発泡度・低結晶度なマグマ (Yamanoi *et al.*, 2008; 阪上・他, 2011). またその下部には低発泡度・低結晶度なマグマが存在するという描像が得られている (Clarke *et al.*, 2007; Burgisser *et al.*, 2010). このような発泡度・結晶度の垂直分布の形成過程について Diller *et al.* (2006) は、上昇するマグマにおいて火道に沿った方向・火道壁方向の脱ガスを考慮した火道流モデルを構築し、計算結果が Soufriere Hills 火山で推定された発泡度の垂直分布と火道浅部の増圧をよく説明するとした (Clarke *et al.*, 2007). 火道浅部マグマの構造や形成過程はよく検討されてきたものの、その定量的な形成条件や、準備過程を反映している前駆 BL 型地震とマグマの性質の関係などは明らかではなかった。そこで著者らは、ブルカノ式噴火の爆発準備過程の詳細を明らかにするため、桜島南岳産火山灰の岩石組織解析や化学分析を行った。

Miwa *et al.* (2009) は桜島南岳で 1970~1980 年代に発生した計 17 回のブルカノ式噴火について、火山灰の岩石学的解析を行うことで、火道浅部の脱ガスマグマの形成条件を定量的に示した。この研究では非発泡・高結晶度粒子について、マイクロライト数密度を調べた。その結果をマイクロライト数密度脱水速度計 (Toramaru *et al.*, 2008) に適用し、水の飽和溶解度則、初期含水量やマグマ密度を仮定することで、マグマ上昇速度を 0.11~0.35 m/s と見積もった。この値は、準プリニー式噴火と溶岩ドーム噴火におけるマグマ上昇速度の中間に位置する (Noguchi *et al.*, 2008; Toramaru *et al.*, 2008)。この研究で求められたマグマ上昇速度はマイクロライト核形成時のものであり、比較的深部 (~4 km) での速度であることは注意が必要である。

Miwa and Toramaru (2013) は、火山灰の気泡・マイクロライト組織・含水量から火道浅部マグマの構造を推定し、下部から上部にかけて、未脱ガス (高気泡数密度)・低結晶度なマグマから、脱ガス (低気泡数密度)・高結晶度なマグマへ変化していくことを明らかにした。発泡組織・結晶組織に垂直分布を持つ火道浅部マグマの形成過程については、爆発前の前駆 BL 型地震群発 (立尾・井口, 2009) の継続時間と火山灰の気泡数密度との正の相関から議論され、低発泡度・高結晶度なマグマに富む火道浅部への、発泡マグマの供給が有力であると示唆された。ブルカノ式噴火における火道浅部への発泡マグマ供給の重要性は、火山灰の岩石学的解析と SO₂ flux 観測の組み合わせからメキシコ・コリマ火山でも示唆されている (Cassidy *et al.*, 2015)。

著者らの研究の重要な点は、岩石学的に得られるマグマ上昇過程の情報と地球物理観測で得られる爆発地震や

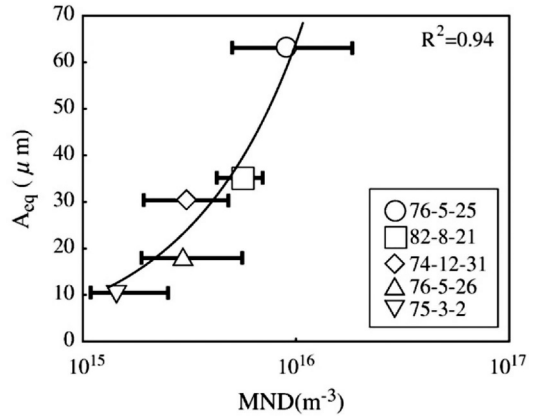


Fig. 1. The relation between microlite number density (MND) and maximum amplitude of explosion earthquake (A_{eq}). Note that the horizontal axis is logarithmic. Modified after Figure 9a in Miwa *et al.* (2009).

空振強度との相関を見出し、噴火準備過程の変化が表面現象のバリエーションと関係することを指摘した点である。Miwa *et al.* (2009) では爆発地震の振幅が大きいイベントほど、火山灰粒子のマイクロライト数密度が大きいことを明らかにした (Fig. 1)。マイクロライト数密度は脱水速度を通して、核形成時のマグマ減圧速度を反映する (Toramaru *et al.*, 2008)。従ってこの結果は、マイクロライト核形成時の減圧速度が大きいほど、結果的に爆発地震が強い噴火が起きることを示している。さらに、Miwa and Toramaru (2013) は空振振幅と火山灰の気泡数密度との相関から、火道浅部に未脱ガスで気泡に富むマグマが多くなると、爆発時の空振振幅が大きくなることを示した (Fig. 2)。この議論により、噴火イベント毎に見られる空振振幅のバリエーションは深部から火道浅部への発泡マグマ供給率の変化を反映していることが示唆された。

3-2 爆発・減圧過程

ガスを含んだ高圧源の破裂というブルカノ式噴火の普遍的イメージを模した衝撃波管実験が行われてきた。衝撃波管実験では、隔壁によって低圧部と隔てられた高圧状態のセルに火砕物やマグマを模擬したアナログ物質を設置し、隔壁を壊し急減圧させ、その破碎過程を観察する (e.g., Alidibirov and Dingwell, 1996)。出発物質の物性や減圧量、減圧速度を系統的に変化させることで、それらが破碎過程に与える影響を評価出来る。減圧量をコントロールする実験では、同じ減圧量ならばマグマの空隙率が大きいほど破碎されやすいこと (Spieler *et al.*, 2004; Kennedy *et al.*, 2005) や、減圧量・破碎面の伝播速度・

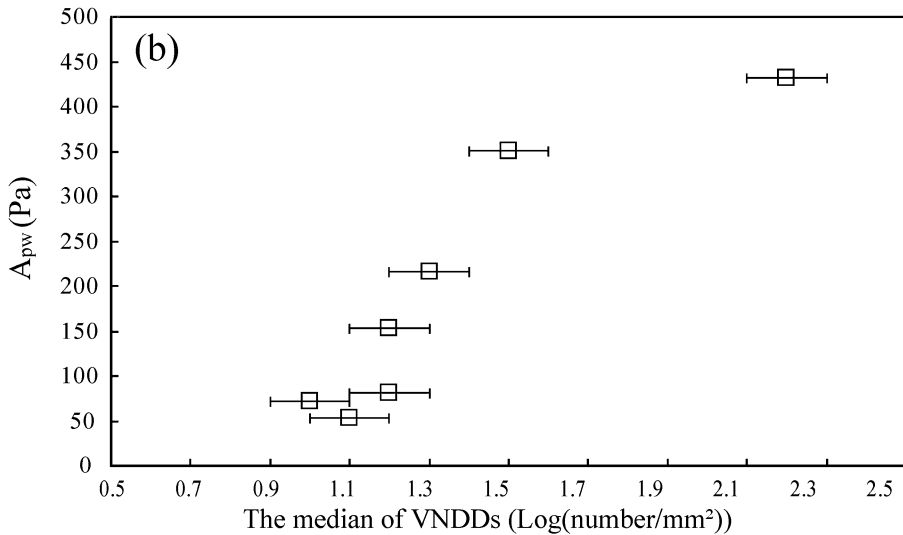
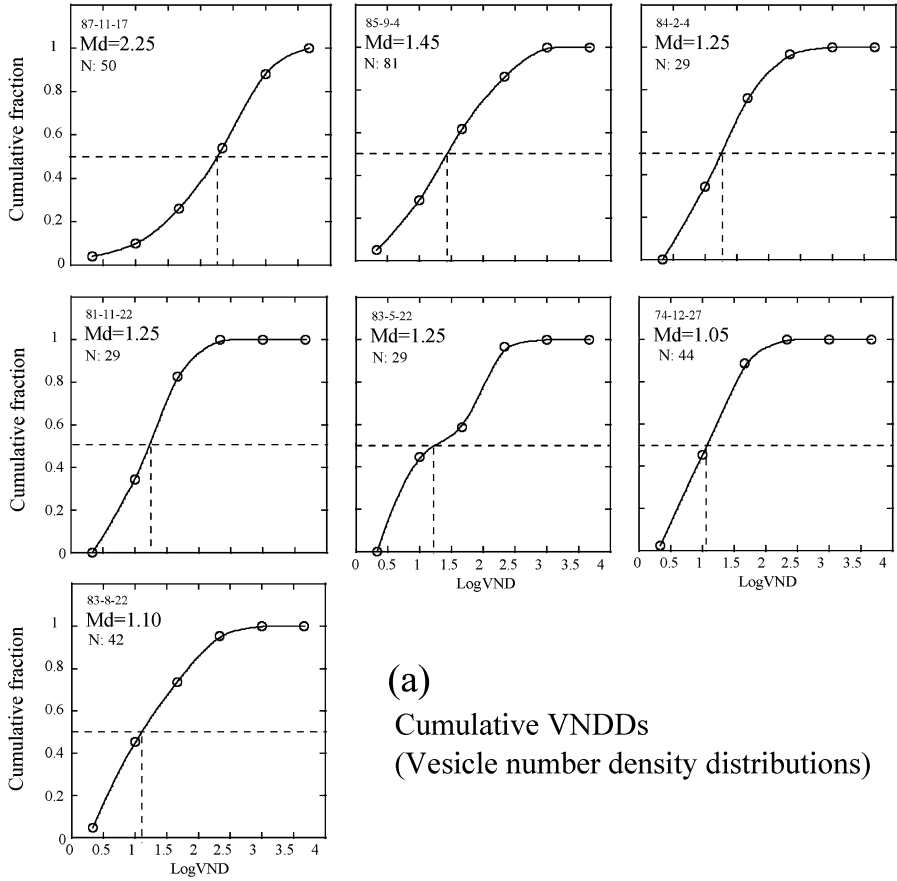


Fig. 2. (a) Cumulative vesicle number density distribution (VNDD) of ash samples erupted from vulcanian eruptions at Minamidake crater of Sakurajima volcano. Three numbers in left upper corners show sampling date, median value of VNDD, and number of particle analyzed. (b) Vertical axis shows the amplitude of pressure wave by the vulcanian eruptions. Horizontal axis represents the median value of VNDD. Modified after Figures 3b and 5a in Miwa and Toramaru (2013).

ジェット噴出速度の関係が衝撃波管理論 (Koyaguchi and Mitani, 2005) で説明できることが分かってきた (Alatorre-Ibargüengoitia *et al.*, 2010). また Kameda *et al.* (2008) は、衝撃波管により急減圧された粘弾性体の振る舞いが減圧タイムスケール (すなわち減圧速度) と粘弾性体のマックスウェル緩和時間との比で予測できることを示した。衝撃波管の実験から示されるように、ガスを含んだ高圧源の減圧過程では、その系が被った減圧量と減圧速度が重要になる。以下では、天然のブルカノ式噴火における減圧量及び減圧速度の見積もりについてまとめていく。

天然のブルカノ式噴火の爆発過程を定量的に理解するため、噴出速度、地球物理観測や物質科学的手法から爆発圧力の推定が行われ、0.1~55 MPa の多様な見積もり値が得られてきた。爆発圧力はマグマが被った減圧量と大気圧の足し合わせである。しかし、一般的に大気圧は爆発圧力よりも一桁以上小さいため、爆発圧力をそのままマグマが被った減圧量と読み替えても差し支えないだろう。1970年代から2000年代初頭まで、爆発圧力はブルカノ式噴火の発生に伴う火山弾やジェットの放出速度から推定され、その値は数10 MPa程度と考えられてきた (Fudali and Melson, 1971; Robertson *et al.*, 1998; Formenti *et al.*, 2003)。地球物理観測による爆発圧力の推定では、爆発地震や空気振動に基づいた力学過程の解析が行われている (e.g., Kanamori *et al.*, 1984; Iguchi *et al.*, 2008)。Nishimura (1998) はブルカノ式噴火を高圧状態に置かれた完全気体あるいは非圧縮性流体の減圧過程としてモデル化し、爆発圧力が1~10 MPa程度であれば爆発地震のマグニチュードと噴出口径の相関を説明できるとした。空気振動を用いた研究では、Morrissey and Chouet (1997) が Ngauruhoe 火山 1975年噴火や十勝岳などのブルカノ式噴火について空振波形を数値コード DASH (Dusty air shock) で解析することで、0.1~6 MPaの爆発圧力を得た。物質科学的手法による爆発圧力推定は、主に軽石の石基ガラス含水量から為されてきた。石基ガラス含水量は飽和溶解度を通して爆発前にマグマが置かれていた圧力条件を反映する。いくつかの研究から、ブルカノ式噴火の爆発圧力は Soufriere Hills 火山、桜島南岳や浅間 2004年噴火において 1.0~55 MPa と推定された (Harford *et al.*, 2003; 竹内・他, 2006; 牧野・他, 2006; Burgisser *et al.*, 2011; 阪上・他, 2011)。桜島南岳のブルカノ式噴火の爆発圧力については、Miwa and Toramaru (2013) による火山灰の石基ガラス含水量からも推定されており、最大 6 MPa と見積もられた。また、Miwa *et al.* (2013) でマイクロライト量から推定された桜島昭和火口のブルカノ式噴火での爆発圧力は、最大 20~40 MPa であった。

爆発圧力を静岩圧と岩石の引張強度を足したものであ

ると仮定すると、この圧力から噴出されたマグマの最大深度を見積もることが出来る。円筒状火道を仮定し、マグマ密度を 2,000 kg/m³、岩石引張強度を 2 MPa (Voight *et al.*, 1999; 阪上・他, 2011)、爆発圧力を 55 MPa 以下とすると、ブルカノ式噴火に伴って噴出されるマグマの深度は <2,000 m と見積もられる。この結果は、ブルカノ式噴火に伴う地殻変動や爆発地震から示唆される浅部圧力源の深度と調和的である (e.g., Tameguri *et al.*, 2002)。また、この深度見積もりは、前述したキャップロックを含めた火道浅部マグマの構造に定量的な制約を与える。

衝撃波管実験で示されているように、噴火時の減圧速度は破碎効率などを通して、噴火過程に大きな影響を与えるため (Kameda *et al.*, 2008)、天然のブルカノ式噴火における爆発時の減圧速度は明らかにすべき点である。しかし、噴出物からブルカノ式噴火に伴う減圧速度を見積もった研究は少ない。Giachetti *et al.* (2010) は Soufriere Hills 火山 1997年のブルカノ式噴火の軽石の気泡サイズ分布を詳細に検討し、爆発と同時に核形成した気泡 (Syn-eruptive bubbles) の数密度を推定、気泡数密度減圧速度計 (Toramaru, 2006) を適用することによって爆発時の減圧速度を 0.3~6.5 MPa/s と見積もった。彼らはこの見積もりが、数値計算で求められた、破碎面の通過による減圧速度 (Melnik and Sparks, 2002) と調和的であると主張した。

桜島火山昭和火口でのブルカノ式噴火における爆発時の減圧速度は、著者らの研究により二通りの方法で求められた。Miwa and Geshi (2012) は、ブルカノ式噴火の後続相 (Clarke *et al.*, 2002) で放出された軽石に含まれる破断結晶が気泡の等方膨張による引っ張りで形成されると考えた。そして、破断結晶のアスペクト比や破断開口幅からマグマ破碎付近の減圧速度を見積もる手法を開発し、0.007~0.078 MPa/s のマグマ減圧速度を得た。また、Miwa *et al.* (2013) では継続時間の短いブルカノ式噴火について、降下火山灰を数分間隔でリアルタイム採取し、噴火のマグマ圧力を反映するマイクロライトの結晶度を調べた。その結果と減圧結晶化実験 (Brugger and Hammer, 2010) を比較したところ、噴火初期から後期にかけて噴出する火山灰が低圧起源 (10~30 MPa) のものから高圧起源 (20~40 MPa) のものへ変化することが分かった (Fig. 3)。この爆発圧力の変化と継続時間からマグマ減圧速度が 0.003~0.3 MPa/s と求められた。以上、二通りの手法から得られたマグマ減圧速度は Giachetti *et al.* (2010) の見積もりよりも二桁程度小さく、破碎面の通過によるものとは考えづらいことから、著者らは得られた減圧速度が発泡マグマの上昇と破碎に伴うものと考えた。このことは、得られた推定値が、マグマの定常的

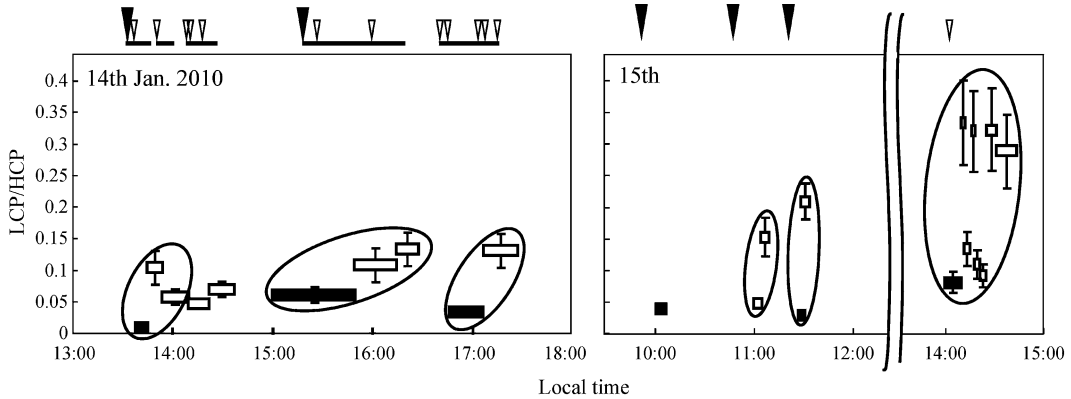


Fig. 3. Temporal variation of the number ratio of low crystallinity particle (LCP) to high crystallinity particle (HCP) in ash samples from vulcanian eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano. Vertical and horizontal axes represent the LCP/HCP ratio and local time, respectively. LCP and HCP are originated from 30–40 and 20–30 MPa of pressure conditions, respectively. Each circle indicates a single eruption. The closed and open squares represent the beginning and subsequent stages of an eruption, respectively. Margins of the squares represent start and end of sampling. The closed triangles indicate the time of onset of an eruption registered by the Japan Meteorological Agency, and the open triangles represent the timing of new ash cloud emission. The solid bars at the top of the diagram indicate duration of ash emission recorded by video images. No video images were obtained on January 15. Modified after Figure 6 in Miwa *et al.* (2013).

な上昇・破碎を伴うプリニー式噴火や準プリニー式噴火での減圧速度と同程度であることから支持される (e.g., Castro and Gardner, 2008; Humphreys *et al.*, 2008).

減圧速度の検討は単発的で短いブルカノ式噴火でもマグマ上昇過程の時間変化があることを示す。まず、キャップロックの破壊により急激な減圧が発生し、膨張波が火道内を伝播する。その後、破碎面の通過による減圧 (~ 1 MPa/s)、噴煙放出に伴う比較的緩やかな減圧 (~ 0.01 MPa/s) へ移り変わっていく。爆発圧力 (減圧量) の多様性から示唆されるように、ブルカノ式噴火における減圧速度やその時間変化は火山・噴火毎に異なると予測される。今後は高時間分解能な火山灰試料を用いた岩石学や、軽石の気泡組織の丹念な解析を行うことで、減圧速度を含めたブルカノ式噴火の減圧過程の多様性が明らかになっていくだろう。

4. ブルカノ式噴火活動の中長期変動

ブルカノ式噴火の活動は活動度を変化させながら数か月～数十年間と長期間続くことがある。前述のように桜島火山では、1955年から主たる活動火口を南岳から昭和火口に変えつつ現在まで続けている (石原, 2000)。桜島火山では、この活動に伴う地震活動・地殻変動・空振活動などが長期間且つ定期的に測定され、深部から浅部にかけてのマグマの動きと中長期変動のパターンがよく分かっている (Iguchi, 2013)。また、噴火活動が直接観察

されていない場合でも、火山の周辺には「火山砂」の堆積がしばしば観察される。火山砂堆積物は発泡度が低く (Andronico and Cioni, 2002; Cimarelli *et al.*, 2008)、その等層厚線図は火口を中心とする同心円状になることが多い (Nakamura, 1965; 井村, 1991, 1995)。この特徴は、多数回のブルカノ式噴火による噴出物が季節風に流された結果と考えるとよく説明できる。

噴火活動の変化を評価する上では地球物理観測と同様に、火山砂をはじめとした噴出物の粒度、構成物比や岩石学的特徴などを時系列で調べることが基本になるだろう。しかし、ブルカノ式噴火による堆積物は一般的に少量であり容易に再移動するため、堆積構造から噴出物の詳細な時間情報を抽出するのは難しい。火山砂からなる堆積物の密度や有機物量から長期間の小規模噴火活動を評価する手法が提案されているもの (井村, 1991, 1995)、時間解像度という面で不満が残る。これに対して、幸運にも堆積直後の噴出物が採取された場合には、比較的時間情報が明瞭な試料を用いて、詳細な岩石学的解析が可能になる。例えばいくつかの先行研究では、堆積直後に採取された桜島昭和火口産噴出物について、化学分析、色分析、X線回折分析を行い、2006年から数年にわたる火道確立過程と、マグマ供給系の変化とブルカノ式噴火活動の中長期的な消長の関係が論じられた (宮城・他, 2010; Matsumoto *et al.*, 2013)。このように、時間情報が明瞭な噴出物に対する岩石学は、火道内過程やマグマの

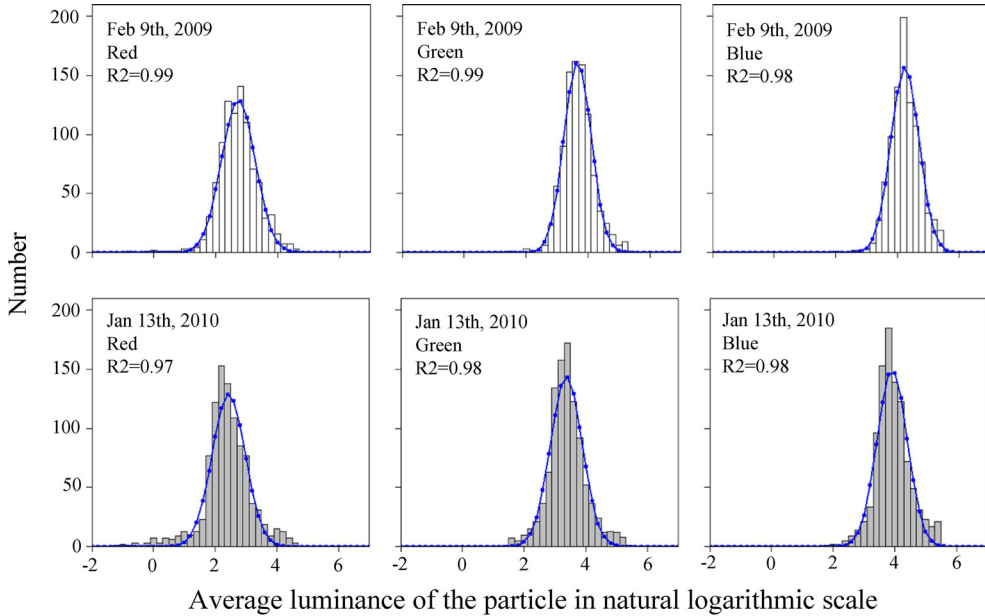


Fig. 4. Frequency distribution of the average of apparent luminance of the ash particles through RGB filters. The samples were the ejected ash from the eruptions on Feb. 9th, 2009 and Jan. 13th, 2010, respectively. The former and latter dates are included in inactive and active terms, respectively, in terms of daily number of eruption. The horizontal axis is in natural logarithmic scale with the average of apparent luminance through each color filters and the vertical axis being the number of particles. The apparent luminance is represented by 256 tones at each pixel in the ash particles in which black and white colors are set to 0 and 255 in 256 tones, respectively. The average of the apparent luminance of a single ash particle is calculated as $\bar{l}_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n l_{ci}$, where the subscript c represents the color filter, n is the number of pixels in an ash particle, and l_{ci} represents the luminance in 256 tone of the i -th pixel. The lines are result of lognormal fitting by chi-squared minimization. R2 shows the coefficient of determination for the fitting. The luminances through RGB filters are higher in the ash sample in Feb. 9th, 2009. Modified after Figure 4 in Miwa *et al.* (2015).

性質などの中長期的変化を明らかにしてきた。しかしながら、その試料は数が限られたものであり、採取の時間間隔及び手法が系統的ではなく運任せであったと言わざるを得ない。マグマや噴出物の情報を中長期的な噴火活動の評価に用いるならば、より系統的・機械的に多量の試料採取を行うことが望まれる。このような状況で Shimano *et al.* (2013) は画期的な自動降灰試料採取装置を開発した。彼らの自動降灰試料採取装置 (SATSUMA) は、数分から数日の間隔で最大 36 個の試料を採取可能であり、実際に 2008 年から 2012 年にかけてほぼ毎日、桜島昭和火口からの降灰試料を採取し続けた。これで、系統的・機械的に試料を得る目的がたったと言えよう。

自動降灰試料採取装置の登場により試料採取に目的が立ったものの、実体顕微鏡観察及び電子顕微鏡観察による構成物解析や、EPMA などを用いた化学組成分析は、数千を超えるような大量の試料の解析には不向きである。そこで著者は、大量の試料を迅速且つ客観的に特徴

づけるため、画像解析を用いた火山灰粒子の解析手法を開発した (Miwa *et al.*, 2015)。この手法は火山灰粒子の写真撮影した画像データを、新たに開発した画像解析プログラムで解析することにより、輝度と形態を一粒粒子ずつ定量化する。この手法では粒子画像撮影から結果の出力まで、1,000 粒の粒子について約 4 時間で解析可能である。この手法を桜島昭和火口のブルカノ式噴火活動に適用した結果、噴火回数が少ない時期の火山灰には輝度が高い粒子が多く含まれることが分かった (Fig. 4)。桜島昭和火口産の火山灰では変質粒子において輝度が高くなるため、この結果は、噴火活動が不活発な時に変質粒子が多くなることを示している。

5. まとめと今後の展望

著者らの研究と先行研究により明らかとなっているブルカノ式噴火の特徴を以下にまとめる。

- ・ブルカノ式噴火の準備過程では火道出口が開放系から

閉鎖系へと変化し、爆発前には火道浅部にキャップロックが形成されている。このキャップロックは深度方向に発泡度と結晶度の勾配を持ち、最上部に低発泡度・高結晶度なマグマ、その下部には高発泡度・低結晶度なマグマ、またその下部には低発泡度・低結晶度なマグマが存在する。

- ・キャップロックが形成されるときマイクロライト核形成時のマグマ上昇速度は0.11-0.35 m/sと見積もられ、この値はサブプリニー式噴火とドーム噴火による上昇速度の中間にあたる。
- ・ブルカノ式噴火に伴ってマグマが被る最大減圧量は0.1~55 MPaと噴火毎に大きな幅を持ち、そこから推定される圧力源マグマ深度は<2,000 mである。
- ・ブルカノ式噴火に伴ってマグマが経験する減圧速度は0.01~10 MPa/sであり、噴火推移とともに減圧速度が減少していく。
- ・ブルカノ式噴火活動の中長期変動をマグマの性質と噴火過程の面から調べるため、試料採取法・解析法が発達してきた。画像解析を用いた火山灰の解析の結果、桜島火山では噴火活動が不活発なときほど変質した粒子が多くなることが分かった。

本章では最後にブルカノ式噴火研究の課題として、噴火開始過程の解明を挙げておきたい。ブルカノ式噴火のモデルではSelf *et al.* (1979)のように、火道最上部のキャップロックを速やかに取り外すと考えるが、実際のブルカノ式噴火における噴火開始過程はそう単純ではない。空振観測から、噴出物やガスが噴出する少し前に火口底が押し上げられていることが推定されている(Yokoo *et al.*, 2009)。また、噴出物に見られる tuffisite vein の観察からキャップロックにおける亀裂形成が噴火開始と関連していることも示唆されている(Cassidy *et al.*, 2015)。噴火開始過程に依存する減圧速度は、火道浅部キャップロックの構造との組み合わせによって、ブルカノ式噴火の規模や定常的な噴火への様式遷移を支配し(Gottsmann *et al.*, 2011; Miwa *et al.*, 2013)、ブルカノ式噴火の特徴である継続時間の長さにも関与している可能性がある。このような噴火開始過程の実態を明らかにするには、噴出物、火山ガス、地殻変動、空振、熱観測等の多項目観測を行い、噴火直前から噴火後にかけての物質移動や圧力蓄積の時空間分布を高分解能に理解する必要がある(Miwa *et al.*, 2009; Miwa and Toramaru, 2013; Cassidy *et al.*, 2015)。また、減圧結晶化及び噴出物の溶結に伴うマグマ強度の発展(Quane *et al.*, 2009; Brugger and Hammer, 2010; Okumura and Sasaki, 2014; Heap *et al.*, 2015)、気泡や空隙などによる界面エネルギーを最小化するように働く構造緩和(Otsuki *et al.*, 2015)や、変形に伴う気泡の再

配置(Laumonier *et al.*, 2011)など、火道浅部マグマで起こりうる素過程を再現する室内実験も重要になるだろう。あるいは、無人飛行物体やロボット技術を駆使することで、噴火開始時の表面現象を直接観察できるかもしれない。天然の物質科学、室内実験、地球物理観測が三位一体となることで、ブルカノ式噴火の実態、ひいては火山噴火メカニズムの理解へ貢献することが期待される。

謝 辞

本稿は平成26年度日本火山学会研究奨励賞の受賞を機に執筆の機会を頂いたものである。まず、受賞にあたって産業技術総合研究所・篠原宏志博士をはじめとする日本火山学会関係者の皆様には大変お世話になった。本稿で紹介した内容は、九州大学・産業技術総合研究所・東北大学で行った研究をまとめたものである。九州大学の寅丸敦志教授には共同研究者・指導教員として強力なご支援と自由活発な研究環境を与えていただいた。東北大学・西村太志教授、京都大学・井口正人教授からは地球物理の観点から適切な助言とご指導をいただいている。産業技術総合研究所・篠原宏志博士からは研究内容について率直なご意見をいただいている。産業技術総合研究所・下司信夫博士と常葉大学・嶋野岳人准教授には、研究の進め方から論文の書き方まで、日ごろから様々な相談をさせていただいている。このほか、九州大学、産業技術総合研究所、東北大学、防災科学技術研究所の皆様、及び火山学コミュニティの先輩・後輩諸氏から多大なるご協力をいただいていた。また、本稿は北海道大学・橋本武志教授と東北大学・小園誠史助教の丁寧な査読により改善された。記して感謝の意を表する。

引用文献

- Alatorre-Ibargüengoitia, M., Scheu, B., Dingwell, D., Delgado-Granados, H. and Taddeucci, J. (2010) Energy consumption by magmatic fragmentation and pyroclast ejection during Vulcanian eruptions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **291**, 60-69.
- Alidibirov, M. and Dingwell, D. (1996) An experimental facility for the investigation of magma fragmentation by rapid decompression. *Bull. Volcanol.*, **58**, 411-416.
- Andronico, D. and Cioni, R. (2002) Contrasting styles of Mount Vesuvius activity in the period between the Avellino and Pompeii Plinian eruptions, and some implications for assessment of future hazards. *Bull. Volcanol.*, **64**, 372-391.
- Brugger, C. and Hammer, J. (2010) Crystallization Kinetics in Continuous Decompression Experiments: Implications for Interpreting Natural Magma Ascent Processes. *J. Petrol.*, **51**, 1941-1965.
- Burgisser, A., Poussineau, S., Arbaret, L., Druitt, T., Giachetti, T. and Bourdier, J. (2010) Pre-explosive conduit conditions

- of the 1997 Vulcanian explosions at Soufrière Hills Volcano, Montserrat: I. Pressure and vesicularity distributions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **194**, 27–41.
- Burgisser, A., Arbaret, L., Druitt, T. and Giachetti, T. (2011) Pre-explosive conduit conditions of the 1997 Vulcanian explosions at Soufrière Hills Volcano, Montserrat: II. Overpressure and depth distributions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **199**, 193–205.
- Carey, S. and Sigurdsson, H. (1989) The intensity of plinian eruptions. *Bull. Volcanol.*, **51**, 28–40.
- Cashman, K. (1992) Groundmass crystallization of Mount St. Helens dacite, 1980–1986: a tool for interpreting shallow magmatic processes. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **109**, 431–449.
- Cassidy, M., Cole, P., Hicks, K., Varley, N., Peters, N. and Lerner, A. (2015) Rapid and slow: Varying magma ascent rates as a mechanism for Vulcanian explosions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **420**, 73–84.
- Castro, J. and Gardner, J. (2008) Did magma ascent rate control the explosive-effusive transition at the Inyo volcanic chain, California? *Geology*, **36**, 279–282.
- Cimarelli, C., De Rita, D., Dolfi, D. and Procesi, M. (2008) Coeval strombolian and vulcanian-type explosive eruptions at Panarea (Aeolian Islands, Southern Italy). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **177**, 797–811.
- Clarke, A., Voight, B., Neri, A. and Macedonio, G. (2002) Transient dynamics of vulcanian explosions and column collapse. *Nature*, **415**, 897–901.
- Clarke, A., Stephens, S., Teasdale, R., Sparks, R. and Diller, K. (2007) Petrologic constraints on the decompression history of magma prior to Vulcanian explosions at the Soufrière Hills volcano, Montserrat. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **161**, 261–274.
- Diller, K., Clarke, A., Voight, B. and Neri, A. (2006) Mechanisms of conduit plug formation: Implications for vulcanian explosions. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L20302, doi: 10.1029/2006GL027391.
- Eichelberger, J., Carrigan, C., Westrich, H. and Price, R. (1986) Non-explosive silicic volcanism. *Nature*, **323**, 598–602.
- Formenti, Y., Druitt, T. and Kelfoun, K. (2003) Characterisation of the 1997 Vulcanian explosions of Soufrière Hills Volcano, Montserrat, by video analysis. *Bull. Volcanol.*, **65**, 587–605.
- Fudali, R. and Melson, W. (1971) Ejecta velocities, magma chamber pressure and kinetic energy associated with the 1968 eruption of Arenal volcano. *Bull. Volcanol.*, **35**, 383–401.
- Giachetti, T., Druitt, T., Burgisser, A., Arbaret, L. and Galven, C. (2010) Bubble nucleation, growth and coalescence during the 1997 Vulcanian explosions of Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **193**, 215–231.
- Gottsmann, J., De Angelis, S., Fournier, N., Van Camp, M., Sacks, S., Linde, A. and Ripepe, M. (2011) On the geophysical fingerprint of Vulcanian explosions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **306**, 98–104.
- Hammer, J., Cashman, K., Hoblitt, R. and Newman, S. (1999) Degassing and microlite crystallization during pre-climactic events of the 1991 eruption of Mt. Pinatubo, Philippines. *Bull. Volcanol.*, **60**, 355–380.
- Harford, C., Sparks, R. and Fallick, A. (2003) Degassing at the Soufrière Hills Volcano, Montserrat, recorded in matrix glass compositions. *J. Petrol.*, **44**, 1503–1523.
- Heap, M., Farquharson, J., Wadsworth, F., Kolzenburg, S. and Russell, J. (2015) Timescales for permeability reduction and strength recovery in densifying magma. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **429**, 223–233.
- Hoblitt, R., Wolfe, E., Scott, W., Couchman, M., Pallister, J. and Javier, D. (1996) The preclimactic eruptions of Mount Pinatubo, June 1991. In *Fire and Mud: eruptions and lahars of Mount Pinatubo, Philippines* (Newhall, C. and Punongbayan, R. eds), 457–511. Univ. of Washington.
- Humphreys, M., Menand, T., Blundy, J. and Klimm, K. (2008) Magma ascent rates in explosive eruptions: constraints from H₂O diffusion in melt inclusions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **270**, 25–40.
- Iguchi, M. (2013) Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano, as revealed by geophysical observations. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58**, 1–18.
- Iguchi, M., Yakiwara, H., Tameguri, T., Hendrasto, M. and Hirabayashi, J. (2008) Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at the Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178**, 1–9.
- 井村隆介 (1991) 諏訪之瀬島火山の最近 200 年間の噴火堆積物: 火山砂層による噴火活動の消長の評価. 地質雑, **97**, 865–868.
- 井村隆介 (1995) 小噴火の累積でつくられた堆積物. 火山, **40**, 119–131.
- 石原和弘 (2000) ブルカノ式噴火の特性とその発生場. 月刊地球, **22**, 308–314.
- Kameda, M., Kuribara, H. and Ichihara, M. (2008) Dominant time scale for brittle fragmentation of vesicular magma by decompression. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L14302, doi: 10.1029/2008GL034530.
- Kanamori, H., Given, J. and Lay, T. (1984) Analysis of seismic body waves excited by the Mount St. Helens eruption of May 18, 1980. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **89**, 1856–1866.
- Kennedy, B., Spieler, O., Scheu, B., Kueppers, U., Taddeucci, J. and Dingwell, D. (2005) Conduit implosion during Vulcanian eruptions. *Geology*, **33**, 581–584.
- Koyaguchi, T. and Mitani, N. (2005) A theoretical model for fragmentation of viscous bubbly magmas in shock tubes. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **110**, B10202, doi: 10.1029/2004JB003513.
- Laumonier, M., Arbaret, L., Burgisser, A. and Champallier, R. (2011) Porosity redistribution enhanced by strain localization in crystal-rich magmas. *Geology*, **39**, 715–718.
- 牧野州明・津金達郎・曾根原崇文・三宅康幸 (2006) 浅間火山 2004 年 9 月の噴出物の石基ガラスの含水量測定. 火山, **51**, 151–159.
- Matsumoto, A., Nakagawa, M., Amma-Miyasaka, M. and

- Iguchi, M. (2013) Temporal variation of the petrological features of the juvenile materials during 2006 to 2010 from Showa crater, Sakurajima volcano, Kyushu, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58**, 191-212.
- Melnik, O. and Sparks, R. (1999) Nonlinear dynamics of lava dome extrusion. *Nature*, **402**, 37-41.
- Melnik, O. and Sparks, R. (2002) Dynamics of magma ascent and lava extrusion at Soufrière Hills Volcano, Montserrat. *Geological Society London Memoirs*, **21**, 153-171.
- 宮城磯治・伊藤順一・篠原宏志 (2010) 火山灰から見た2008年の桜島昭和火口の再活動過程. *火山*, **55**, 21-39.
- Miwa, T. and Geshi, N. (2012) Decompression rate of magma at fragmentation: Inference from broken crystals in pumice of vulcanian eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **227-228**, 76-84.
- Miwa, T., Geshi, N. and Shinohara, H. (2013) Temporal variation in volcanic ash texture during a vulcanian eruption at the Sakurajima volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **260**, 80-89.
- Miwa, T., Shimano, T. and Nishimura, T. (2015) Characterization of the luminance and shape of ash particles at Sakurajima volcano, Japan, using CCD camera images. *Bull. Volcanol.*, **77**, 5, DOI 10.1007/s00445-014-0886-7.
- Miwa, T. and Toramaru, A. (2013) Conduit process in vulcanian eruptions at Sakurajima volcano, Japan: Inference from comparison of volcanic ash with pressure wave and seismic data. *Bull. Volcanol.*, **75**, 685, DOI 10.1007/s00445-012-0685-y.
- Miwa, T., Toramaru, A. and Iguchi, M. (2009) Correlations of volcanic ash texture with explosion earthquakes from vulcanian eruptions at Sakurajima volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **184**, 473-486.
- Morrissey, M. and Mastin, L. (2000) Vulcanian eruptions. In *Encyclopedia of volcanoes* (Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H. and Stix, J. eds), 463-475. Academic press, San Diego.
- Morrissey, M. and Chouet, B. (1997) Burst conditions of explosive volcanic eruptions recorded on microbarographs. *Science*, **275**, 1290-1293.
- Nairn, I. and Self, S. (1978) Explosive eruptions and pyroclastic avalanches from Ngauruhoe in February 1975. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **3**, 39-60.
- Nakada, S., Nagai, M., Kaneko, T., Suzuki, Y. and Maeno, F. (2013) The outline of the 2011 eruption at Shinmoe-dake (Kirishima), Japan. *Earth Planets Space*, **65**, 475-488.
- Nakada, S., Shimizu, H. and Ohta, K. (1999) Overview of the 1990-1995 eruption at Unzen Volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 1-22.
- Nakamura, K. (1965) Volcano-Stratigraphic Study of Oshima Volcano, Izu. *Bull. Earth. Res. Ins. Univ. Tokyo*, **42**, 649-728.
- Nishimura, T. (1998) Source mechanisms of volcanic explosion earthquakes: single force and implosive sources. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **86**, 97-106.
- Nogami, K., Iguchi, M., Ishihara, K., Hirabayashi, J. and Miki, D. (2006) Behavior of fluorine and chlorine in volcanic ash of Sakurajima volcano, Japan in the sequence of its eruptive activity. *Earth Planets Space*, **58**, 595-600.
- 野上健治・鬼澤真也・平林順一 (2008) 2004年浅間山噴火における地球化学的観測研究—噴出物の水溶性成分の変動と火山活動—. *火山*, **53**, 69-77.
- Noguchi, S., Toramaru, A. and Nakada, S. (2008) Relation between microlite textures and discharge rate during the 1991-1995 eruptions at Unzen, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **175**, 141-155.
- 大庭昇・山本温彦・富田克利・大迫暢光・井ノ上幸造・中村俊文 (1981) 1979~1980年噴出桜島火山灰の構成物質、性状および生成メカニズム. 鹿児島大学理学部紀要, 地学・生物学, **14**, 1-19.
- Okumura, S. and Sasaki, O. (2014) Permeability reduction of fractured rhyolite in volcanic conduits and its control on eruption cyclicity. *Geology*, **42**, 843-846.
- Otsuki, S., Nakamura, M., Okumura, S. and Sasaki, O. (2015) Interfacial tension-driven relaxation of magma foam: An experimental study. *J. Geophys. Res.: Solid Earth*, **120**, doi: 10.1002/2015JB012391.
- Quane, S., Russell, J. and Friedlander, E. (2009) Time scales of compaction in volcanic systems. *Geology*, **37**, 471-474.
- Robertson, R., Cole, P., Sparks, R., Harford, C., Lejeune, A., McGuire, W., Miller, A., Murphy, M., Norton, G. and Stevens, N. (1998) The explosive eruption of Soufriere Hills Volcano, Montserrat, West Indies, 17 September, 1996. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3429-3432.
- 阪上雅之・佐々木寿・三宅康幸・向山 栄 (2011) IKONOS 高分解能衛星画像と現地踏査を併用したブルカノ式噴火噴出物の解析. *地質雑*, **117**, 671-685.
- Self, S., Wilson, L. and Nairn, I. (1979) Vulcanian eruption mechanisms. *Nature*, **277**, 440-443.
- Shimano, T., Nishimura, T., Chiga, N., Shibasaki, Y., Iguchi, M., Miki, D. and Yokoo, A. (2013) Development of an automatic volcanic ash sampling apparatus for active volcanoes. *Bull. Volcanol.*, **75**, 1-7.
- Sparks, R. (1997) Causes and consequences of pressurisation in lava dome eruptions. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **150**, 177-189.
- Spieler, O., Kennedy, B., Kueppers, U., Dingwell, D., Scheu, B. and Taddeucci, J. (2004) The fragmentation threshold of pyroclastic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **226**, 139-148.
- Stix, J., Torrs, R., Narváez, L., Raigosa, J., Gómez, D. and Castonguay, R. (1997) A model of vulcanian eruptions at Galeras volcano, Colombia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **77**, 285-303.
- 竹内晋吾・奥村 聡・山野井勇太 (2006) ブルカノ式噴火の発生要因としての火道浅部マグマの増圧過程. *岩石鉱物科学*, **35**, 144-152.
- 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.
- 立尾有騎・井口正人 (2009) 桜島におけるBL型地震群発活動に伴う地盤変動. *火山*, **54**, 175-186.
- Toramaru, A. (2006) BND (bubble number density) decompression rate meter for explosive volcanic eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **154**, 303-316.

- Toramaru, A., Noguchi, S., Oyoshihara, S. and Tsune, A. (2008) MND (microlite number density) water exsolution rate meter. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **175**, 156-167.
- Turcotte, D., Ockendon, H., Ockendon, J. and Cowley, S. (1990) A mathematical model of vulcanian eruptions. *Geophys. J. Int.*, **103**, 211-217.
- Voight, B., Sparks, R., Miller, A., Stewart, R., Hoblitt, R., Clarke, A., Ewart, J., Aspinall, W., Baptie, B. and Calder, E. (1999) Magma flow instability and cyclic activity at Soufriere Hills Volcano, Montserrat, British West Indies. *Science*, **283**, 1138-1142.
- Woods, A. (1995) A model of vulcanian explosions. *Nucl. Eng. Des.*, **155**, 345-357.
- Yamagishi, H. and Feebrey, C. (1994) Ballistic ejecta from the 1988-1989 andesitic Vulcanian eruptions of Tokachidake volcano, Japan: morphological features and genesis. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **59**, 269-278.
- Yamanoi, Y., Takeuchi, S., Okumura, S., Nakashima, S. and Yokoyama, T. (2008) Color measurements of volcanic ash deposits from three different styles of summit activity at Sakurajima volcano, Japan: Conduit processes recorded in color of volcanic ash. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178**, 81-93.
- Yokoo, A., Iguchi, M., Tameguri, T. and Yamamoto, K. (2013) Processes prior to outbursts of vulcanian eruption at Showa crater of Sakurajima volcano. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58**, 163-181.
- Yokoo, A., Tameguri, T. and Iguchi, M. (2009) Swelling of a lava plug associated with a Vulcanian eruption at Sakurajima Volcano, Japan, as revealed by infrasound record: case study of the eruption on January 2, 2007. *Bull. Volcanol.*, **71**, 619-630.

(編集担当 橋本武志)