

地球物理学的多項目観測から見た噴火過程

中道治久*・青山 裕**

(2015 年 10 月 19 日受付, 2015 年 12 月 11 日受理)

Eruption Process Inferred from Multi-parameter Geophysical Observations

Haruhisa NAKAMICHI* and Hiroshi AOYAMA**

This paper reviews the eruption processes, as well as the processes leading up to the eruption, as revealed by multi-parameter geophysical observations.

First, we briefly describe the history and development of geophysical observational methods in Japan. A prototype of multi-parameter geophysical observation had already been established at a few volcanoes in Japan 50 years ago. To obtain high-quality geophysical data, underground tunnels and boreholes had been constructed around volcanoes, and seismometers, tiltmeters, and strainmeters had been installed in them during the 1980s and 1990s. Broadband seismometers and a data logger with a GPS clock that are small and lightweight, were introduced in the mid-1990s. Combined with large data storage capacity in the data loggers and efficient data transmission using IP protocols, simultaneous multi-parameter geophysical observations have been intensively and continuously conducted since the early 2000s in order to reveal the eruption processes. Since then, various analysis methods suitable for multi-parameter observations have been developed. Although the time scales of volcanic eruptions vary widely, from several seconds to several decades, most of these scales are covered by multi-parameter geophysical observation.

We review the advances and challenges for understanding not only the eruption processes, but also the precursory processes leading up to eruptions, which have been revealed by multi-parameter geophysical observations during the past decade. The explosive eruption processes, which include Plinian, Vulcanian, and Strombolian eruptions, and effusive eruptions, which include Hawaiian and dome-forming eruptions, are also reviewed. Physical models for these types of eruptions have been developed experimentally and theoretically, and examined later using geophysical observations. For each type of eruption, we briefly introduce the proposed physical models and describe their progress, mainly from the viewpoint of multi-parameter geophysical observations. The eruption processes of Plinian eruptions have been revealed mainly by worldwide seismic and infrasound observation networks and satellite images. Vulcanian and Strombolian eruptions are most intensively studied by multi-parameter geophysical observations, because of their high-frequency nature and accessibility to the proximity of active craters in deploying monitoring instruments. For example, the precursory processes of Vulcanian eruptions are characterized by inflation, relatively stable, and slight deflation stages of the volcano edifices, which are inferred by continuous crustal deformation measurements. Strombolian eruptions are understood as repeating strong gas bursts at the surface of liquid magma. Recently, new monitoring techniques such as high-speed cameras and portable radar units have been introduced to observe the Strombolian surface activities. Hawaiian eruptions are characterized by explosive lava fountains and large lava flows traveling more than several kilometers. Multi-parameter observations are quite useful for monitoring the locations of dike intrusions and lava fountains. Dome-forming eruptions have the longest time-scales among these eruption styles. Temporal fluctuations of dome growth are well monitored by geodetic and photogrammetric observations. Recent seismic observations of dome-forming have revealed the characteristic repeating earthquakes and provided new insights

* 〒891-1419 鹿児島県鹿児島市桜島横山町 1722-19
京都大学防災研究所附属火山活動研究センター
Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 1722-19
Sakurajima-Yokoyama-cho, Kagoshima 891-1419, Japan.

** 〒060-0810 北海道札幌市北区北 10 条西 8
北海道大学大学院理学研究院附属地震火山研究観測センター

Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Hokkaido University, Kita 10 Nishi 8, Kita-ku, Sapporo 060-0810, Japan.

Corresponding author: Haruhisa Nakamichi
e-mail: nakamichi@svo.dpri.kyoto-u.ac.jp

into the physical mechanisms of dome growth. Our understanding of the physical process of phreatic eruptions is quite limited relative to magmatic eruptions. Recently, tilt changes associated with tremors were sometimes observed before phreatic eruptions at several volcanoes, and may be forerunners of phreatic eruptions. We need much more data to understand the processes leading up to phreatic eruptions.

Erupted volumes and rates are inferred from multi-parameter geophysical observations, including both seismic and geodetic methods, and confirmed by satellite data and ground-based surveys. The volumes and rates are related to eruption energy. The energy is partitioned into thermal, kinetic, gravity potential, strain, seismic, acoustic, and fracture energies, most of which are directly measured or interpreted using multi-parameter geophysical observations.

Key words: multi-parameter geophysical observation, explosive eruption, effusive eruption, erupted volume, eruption rate

1. はじめに

本稿では地球物理学的多項目観測から見た火山噴火過程に関する研究成果をまとめる。噴火のタイプには大まかには、本質物が主体の火砕物を放出するマグマ噴火と、本質物がない火砕物を放出する水蒸気噴火がある。ただし、少量の本質物が含まれるマグマ水蒸気噴火を含めて、本稿では水蒸気噴火とする。マグマ噴火を爆発的噴火と非爆発的噴火と大まかに分け、爆発的噴火にはプリニー式、ブルカノ式、ストロンボリ式噴火を含むものとする。非爆発的噴火には、ストロンボリ式噴火、溶岩ドーム噴火、ハワイ式噴火を含むものとする。ストロンボリ式噴火が両者に入っているのは、爆発性に幅があるからである。

本稿では、地球物理学を中心とした複数項目同時観測による噴火過程研究に焦点を当てる。たとえば、井口(2005)は地震、地殻変動連続観測など複数項目の観測から桜島のブルカノ式噴火のプロセスについてレビューしている。地球物理学的多項目観測とはいっても、本稿では筆者が主に行ってきている地震観測や地殻変動連続観測によるものを中心とし、空振、重力、映像等の観測を一部含める。噴火過程を主対象とするため、扱う時間スケールは、噴火の前駆現象出現時、噴火時、噴火直後とする。前駆現象は数分から数時間単位が主な対象となる

が、水蒸気爆発であれば前駆現象についての研究事例が乏しいので対象を月単位まで広げる。また、噴火過程に焦点を当てるが、可能な限り噴火規模（火砕物放出量）や強度（火砕物の単位時間当たりの放出量）の記載をする。噴火の規模の指標としてはVEI (Volcanic Explosivity Index; Newhall and Self, 1982) や噴出物量を用いることが多い。ここでは、VEI、噴出物体積、噴出物重量を用いる。統一はしないのは、引用する文献に沿うためである。参考のため、Table 1 に VEI、噴出物体積、噴出物重量のおおよその関係と噴火例を示す。噴火規模や強度は火山活動を評価し、火山災害と対応させる上で重要ではあるが、後述の通り、伝統的に噴火機構について精力的に研究されてきたため、噴火そのものの規模について記載してある研究は限られる。しかし、地震の規模と頻度分布が地震の発生過程解明に役買っていることから分かるように、噴火規模や強度について系統的に調べることも噴火過程解明の一助となると期待される。

なお、本稿では地球物理学的多項目観測についての解説を入れることにより、噴火過程の解明において多項目観測が今後果たしていく役割を示す。

2. これまでの地球物理学的多項目観測とその重要性

近代的な計測機器を用いた火山観測は、19 世紀中頃に

Table 1. Volcanic explosive index (VEI), erupted volumes and masses.

VEI	Volume (m ³)	Mass (ton)	Example
0	< 10 ⁴	< 2.5 × 10 ⁴	Sakurajima Showa crater explosions
1	10 ⁴ –10 ⁶	2.5 × 10 ⁴ –2.5 × 10 ⁶	Sakurajima Showa crater Aug 18, 2013
2	10 ⁶ –10 ⁷	2.5 × 10 ⁶ –2.5 × 10 ⁷	Usu 2000, Asama 2004, Augustine 2006, Ontake 2014
3	10 ⁷ –10 ⁸	2.5 × 10 ⁷ –2.5 × 10 ⁸	Usu 1977, Miyake 2000, Shinmoe 2011
4	10 ⁸ –10 ⁹	2.5 × 10 ⁸ –2.5 × 10 ⁹	Galunggung 1982, Okmok 2008, Kasatochi 2008, Sarychev Peak 2009, Merapi 2010
5	10 ⁹ –10 ¹⁰	2.5 × 10 ⁹ –2.5 × 10 ¹⁰	Sakurajima Taisho 1914, St. Helens 1980, El Chichon 1982
6	10 ¹⁰ –10 ¹¹	2.5 × 10 ¹⁰ –2.5 × 10 ¹¹	Pinatubo 1991

Volumes and masses are converted vice-versa by a dense-rock-equivalent (DRE) volume. The density of DRE is assumed to be 2,500 kg/m³.

イタリアの Palmieri が電気式の地震計を作成し、Vesuvio 火山の噴火前後に発生した無感規模の火山性地震を観測したことから始まったとされる (下鶴, 1975)。国内における火山観測も、1888 年の磐梯山噴火に際しての関谷らの臨時地震観測や、同年に始められた鹿児島測候所における Milne 式地震計を用いた常時観測など、やはり地震観測から始められた (下鶴・他, 1995)。以降の国内における大学や気象庁の火山観測の歴史については、諏訪 (1965, 1978)、岡田 (1986)、下鶴・他 (1995)、山里 (2005) などにまとめられているので、詳しくはそれらの文献を参照していただきたい。

火山噴火が多様な現象を伴うことから、火山観測の黎明期から複数の観測手法を組み合わせた調査研究が実施されてきた。1910 年の有珠山噴火や 1914 年の桜島噴火では、地震観測に加えて水準測量による比高変化や三角測量による辺長変化の調査も実施され、マグマの移動を示唆する地殻変動がとらえられている (Omori, 1914–1922)。1928 年には阿蘇山に日本で最初の火山観測所が京都大学によって設置され、火山近傍における連続観測が始められた。その後、浅間山 (1933 年) や桜島 (1960 年) など他の火山にも大学の観測所が設けられていった。それらの大学の火山観測施設では、非常に早くから常時地震観測に加えて、傾斜計やひずみ計による地殻変動連続観測のほか、各火山の活動特性に合わせて、温度計、潮位計、磁力計、微気圧計などによる連続観測も実施されていた (下鶴, 1965)。1965 年当時はまだ一部の大学施設に限られていたものの、50 年前にはすでにいくつかの火山において多項目観測の原型が実現されていたわけである。その後も、1980 年代から 1990 年代初めにかけて大学の噴火予知研究観測施設として観測坑道や観測井の整備が進められ、観測所だけではなく無人の衛星観測点においても多項目観測を行える環境が整えられていった。

1990 年代には、火山観測に用いられる計測器や伝送装置、伝送技術に大きな発展が見られた。その一つは、1990 年代半ばから進んだ GNSS (GPS) 観測網の展開である。国土地理院が全国に基盤的 GNSS 観測網を展開したほか、大学などの研究機関でも GNSS 観測が積極的に導入された。これにより、火山周辺の辺長変化や上下変動といった火山活動に伴う変形を高精度で連続的にモニタリングすることが可能になり、従来の辺長観測の多くは GNSS 観測に取って代わられることとなった。その後 2000 年代に入り、「点の変位」を追跡するという GNSS 観測の弱点を補う干渉合成開口レーダー (InSAR) 技術も登場し、地殻変動を面的に把握することもできるようになった (村上, 2005 a)。火山における地殻変動観

測の発展については、本特集号の他の文献を参照されたい (青木, 2016)。もう一つは、観測機器の省電力化と可搬化である。森田・大湊 (2005) が振り返っているように、1980 年代に開発された可搬型広帯域地震計は 1990 年代には国内外で火山観測に導入され、従来の短周期地震計による観測では見出せなかった長周期の信号の存在が次々に明らかになってきた (例えば、Kaneshima *et al.*, 1996; Yamamoto *et al.*, 2002)。ほぼ同時期にデータ変換装置の広ダイナミックレンジ化、伝送装置、記録メディアの小型化、省電力化、大容量化が進んだ。GNSS によるデータ刻時機能を備えたデータ変換装置は、いまや当たり前のように用いられ、機動的な多点観測でも観測点間のデータ時刻同期が問題となることはなくなったほか、数ヶ月にわたるような長期の臨時観測も乾電池やバッテリーで実現できるようになっている。これらに加えて、インターネット技術や通信網が一般にも広く普及したことにより、火山観測データの伝送方法の自由度が高まったことも重要な発展の一つである。1990 年代まで用いられていた観測システムは、専用の装置を専用通信線に接続して決まったフォーマットの時系列データを伝送するというスタイルであったが (森田・大湊, 2005)、インターネット技術を用いることで地震や地殻変動の時系列データだけでなく、例えば画像や動画、GNSS 観測データなど、デジタル化されたデータ形式であれば一つの通信回線で多様なデータを自由に伝送できるようになった。また通信回線の多様化も進み、携帯電話回線を通じてのデータ伝送や、屋外用無線 LAN 通信装置を用いた観測網の展開も行われている。インターネット技術を利用した通信は比較的簡単で自由度が高いため、従来からある観測機器も自動的にデータを収集し伝送できる機能を備えるようになってきている。これらの技術的な発展は、近年の火山観測の機動性や多項目化に大きな影響を与えている。

近年の火山観測において広く普及している観測項目および顕著な成果がある観測項目を Fig. 1 にまとめた。Fig. 1 の上段には代表的な噴火様式について噴火活動の継続時間を、中段には代表的な火山現象のタイムスケールを、下段には火山観測手法ごとの観測周期帯を示した。ここでは火山現象と観測項目の大まかな時間スケールを対比することが目的なので、このスケールと合致しない事例があることはご容赦いただきたい。最上段に示した噴火様式ごとの活動継続時間は、小屋口 (1995) に示された図に基づく。Fig. 1 は示していないが、ハワイ式噴火やストロンボリ式噴火ではマグマそのものの噴出ではなく火山ガスの周期的な放出現象が特徴的に見られる。一回のガス放出イベントの継続時間は数秒から十数秒程

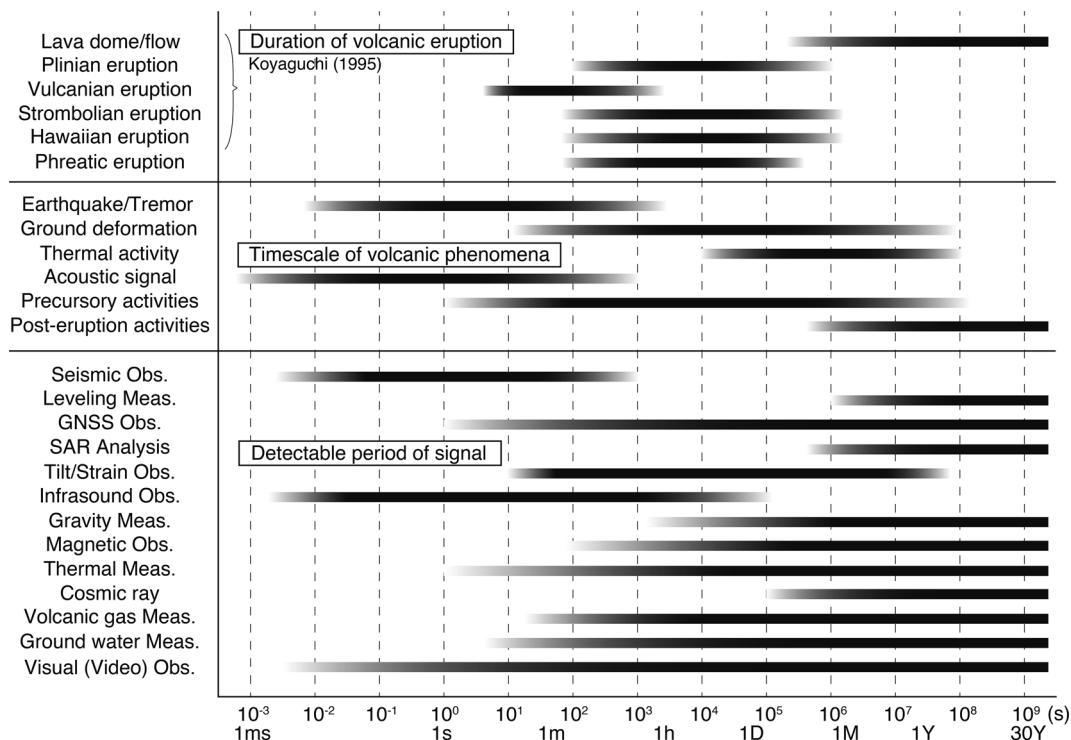


Fig. 1. Time scales of volcanic eruptions, observable phenomena, and detectable signals.

度と、噴火活動全体の継続時間に比べると極めて短い。これら一連の噴火活動の間に、地殻の浅い部分へのマグマの上昇や集積、マグマからの揮発性物質や熱エネルギーの放出、さらに地表や大気中へのマグマの放出といった過程で様々な火山現象が発生する。火山噴火現象における最も短時間の現象の一つは、爆発に伴う衝撃波の生成 (1/1000 秒以下) であろう。これを数十年以上におよぶ溶岩流出の噴火現象と比較すると、時間スケールで 12 桁もの違いがある。Fig. 1 に示したように火山現象は時間的に非常に幅広い多様性をもっている。それゆえ、対象とするそれぞれの現象に適した時間分解能を持つ観測手法の選択が重要となる。

近年の各種火山観測機器と解析手法の発展と火山への適用については、地震観測 (森田・大湊, 2005; Kawakatsu and Yamamoto, 2007; 熊谷・中野, 2009; Chouet and Matoza, 2013), 地殻変動観測 (村上, 2005a; 青木, 2016), 重力観測 (大久保, 2005), 地磁気観測 (橋本, 2005), 熱観測 (金子, 2005), 火山ガス観測 (篠原, 2005; 風早・森, 2016), 空振観測 (Johnson and Ripepe, 2011; Fee and Matoza, 2013) などにまとめられている。

これらの観測手法は決して目新しいものではなく、それぞれの観測項目ごとに重要な火山学的成果が蓄積され

てきた。しかし Fig. 1 から分かるように、これらの観測項目は互いにデータの時間分解能が異なっている。GNSS に同期した時間精度でデータが取得されている観測量がある一方で、個々の機器の内部時計の精度でしかデータが取得されていない観測項目もある。それゆえ異なる観測項目の研究成果を高い時間分解能で定量的に対比することが難しいという問題があった。最近 10 年の研究成果では一部の観測項目において時間分解能の向上 (高サンプリングでのデータ取得) が図られ、従来の観測では見えなかった現象が見出された、あるいは現象同定の時間精度が向上したという例が見られる。その結果として、他の観測項目と高い時間精度でデータを比較検討することが可能となり、火山学的に重要な知見や新しい解釈が導かれている。またこの 10 年で火山観測に導入された新しい技術としては、干渉合成開口レーダーによる地殻変動観測や宇宙線的一种であるミュー粒子を用いた火山体密度トモグラフィーが挙げられる。ただし、これらの新しい観測技術は噴火過程の観測研究という観点から見ると、データを作成するために要する時間インターバルが他の観測項目に比べて長いという側面があり、現時点では噴火前後での変動や構造をとらえるに留まっている。しかしながら、ミュー粒子による密度トモ

グラフィックは、従来の他の観測手法では実現できなかった密度の3次元分布を高空間分解能で独立に推定できるという、極めて優れた長所をもつ。Tanaka *et al.* (2007) の昭和火山の研究例からも期待されるように、溢流的な噴火の発生機構を明らかにしていく上では欠かせない技術といえよう。

多項目観測の進展につれて、複数の観測項目を組み合わせた解析手法や、地震計の傾斜成分を抽出して解析に活用する手法が開発されてきた。広帯域地震観測では、並進と傾斜成分を抽出して、震源や圧力源のモデリングに用いるための手法が開発された(青山, 2008; Aoyama and Oshima, 2008; Maeda *et al.*, 2011)。Ichihara *et al.* (2012) は地震とマイクロフォンの記録を相互相関計算することで空振シグナルを風ノイズと区別する方法を考案した。この手法は悪天候にて視界不良の場合においても噴火を検知するのにも役に立っている。

3. 噴火タイプ別に見た成果の現状と課題

3-1 マグマ噴火

3-1-1 プリニー式噴火

プリニー式噴火は連続的に大量の軽石や火山灰や火山ガスを放出する爆発的噴火である。そして、形成された噴煙柱が成層圏に達する。過去40年間におけるプリニー式噴火は、1977年8月7日の有珠山、1980年5月18日のSt. Helens山、1982年3月29日~4月4日のEl Chichon山、1991年6月15日のPinatubo山、2008年7月12日のOkmok山、2008年8月7日のKasatochi山、2009年6月11日~16日のSarychev山、2014年2月13日のKelud山の噴火であり、プリニー式噴火はおおよそ世界中で5年に一回発生していることになる。

定常状態の仮定をすることで理論的研究はブルカノ式噴火などと比べてかなり先行して行われてきた。例えば、火道内のモデリングについてはPapale and Dobran (1993) が気液二相流非平衡1次元のモデリングを行いマグマ破碎面付近における火道内減圧などを示した。一次元定常火道流モデリングについては小園・三谷 (2006) が詳しいのでそちらを参照されたい。

プリニー式噴火のプロセスの先駆的研究として、St. Helens 噴火を汎地球規模の地震観測ネットワーク(World-Wide Standard Seismography Network) のデータから解明した研究が挙げられる。Kanamori and Given (1982) は、噴火で励起された極長周期(100~260秒)の表面波の放射パターンと時間変化から、最初に噴火に伴い地滑りと横方向のプラストが起こり、次に上方へ噴射する爆発が起こったことを明らかにした。そして、Kanamori *et al.* (1984) は実体波の放射パターンと時間変

化から、噴火のシークエンスにおいて複数回の噴射に伴うそれぞれ25秒程度の継続時間を持つ下向きの力が働いたこと明らかにした。そして、Brodsky *et al.* (1999) は得られた横向きと下向きの力の時間関数を用いて、噴火の最初の数分について上方への質量放出率を $2\sim6\times10^9$ kg/s と算出した。Johnson and Malone (2007) は1980年St. Helens 噴火時に、リージョナルな地震観測網の地震記録に噴火による空振と大気と地面とのカップリングで励起された振動を見つけ、潜在円頂丘内の減圧とその爆発に対応した位相及び火道から到来した位相を見つけた。

Widmer and Zürn (1992) は、Pinatubo 山とEl Chichon 山の噴火時の超長周期の表面波が、大気重力波と音波のそれぞれの基本モードとして励起されたことを明らかにした。そして、Kanamori and Mori (1992) はPinatubo 噴火による超長周期表面波(レイリー波)が周期230秒と270秒に卓越していることを示し、Pinatubo 山近傍における地面と大気との音波と重力波モードのカップリングと結論した。その後、Watada and Kanamori (2010) がこのレイリー波の二つのピーク周期における振幅スペクトル値とピーク間での振幅比をノーマルモード法にて理論的に説明し、この波は地表と熱圏との間にある低音速層でトラップされた大気波の基本モードと1次モードであると結論し、Pinatubo 噴火のエネルギーのうち大気内波動を励起させた分を 7×10^{18} J と推定した。

Okmok 山、Kasatochi 山、そしてSarychev 山の噴火メカニズムの解明には、衛星可視・熱画像とCTBTOの国際監視システム(IMS)の空振観測データが使われた。Rybin *et al.* (2011) は可視と熱赤外の衛星画像から、Sarychev 山において2009年6月11日~16日に少なくとも23回の爆発があったことを明らかにし、噴煙柱高度は海拔8~21 km と推定した(Fig. 2)。火山灰拡散範囲は $1,500\times3,000$ km にも及んだことがわかった。衛星画像と現地調査を合わせて、テフラ堆積物の体積を 4×10^8 m³、つまりVEI4と推定した。Urai and Ishizuka (2011) は、ASTERの衛星可視と近赤外画像を用い、Sarychev 噴火による火砕流、降灰、泥流堆積物の分布を明らかにして、噴出量を 8×10^7 m³ と推定した。Matoza *et al.* (2011) はIMSの空振データからSarychev 山の2009年6月11日~16日の爆発履歴を明らかにして、衛星データから判別した噴火履歴との対応が付き、衛星よりも検知能力が高いことを示した。Fee *et al.* (2010) はOkmok 山とKasatochi 山の2008年噴火について、IMSの空振データと可視と熱赤外の衛星画像データから噴火検出をし、噴火発生時刻、噴火継続時間を求めた。そして、衛星画像にて検知できた成層圏へ噴煙が達したときの空振は、0.01~0.5 Hz の帯

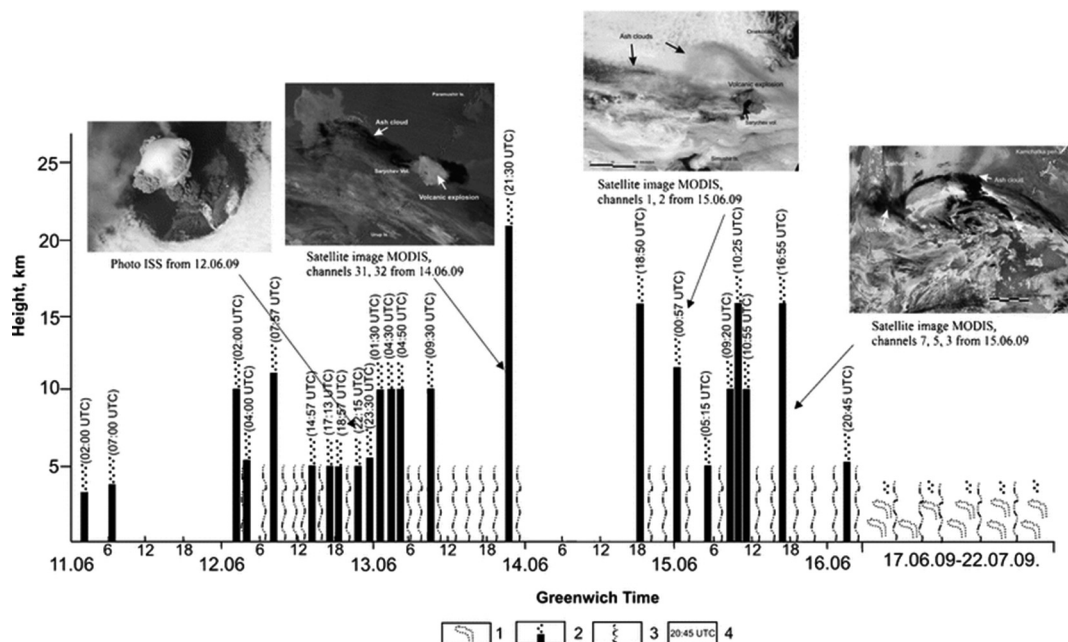


Fig. 2. Eruption column heights of explosive eruptions inferred from satellite observations. Symbols are as follows: 1 gas-steam emissions, 2 explosions, 3 continuous ash emission, 4 times reported in UTC. Figure is taken from Rybin *et al.* (2011). Reprinted from Bulletin of Volcanology, Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles, **73**, 2011, 1377–1392, Rybin A. *et al.*, ©Springer-Verlag 2011, with permission of Springer.

域にエネルギーが卓越し、スペクトルの形状が人工的に作ったジェットノイズのスペクトルと類似していることを指摘した。このことから、プリニー式噴火に伴う空振発生メカニズムとして自己相似的なノイズ生成メカニズム (Matoza *et al.*, 2009) の存在が示唆される。

3-1-2 ブルカノ式噴火

ブルカノ式噴火は島弧の安山岩質火山でしばしば発生する噴火であり、単発的ないし間欠的に爆発が起こる噴火タイプである。噴火継続時間は数十秒から数十分と比較的短時間である。噴火にて、火山弾、火山礫、火山灰、ガスを放出する。火道内圧は数十 MPa とされ、噴火により衝撃波と空振が発生する。火山灰を短時間に大量に放出するので、噴煙柱は数 km から十数 km 程度の高さに成長する。そして、噴煙柱から広範囲にわたって火山灰が降下する。このブルカノは、1888 年～1890 年のエオリア諸島・Vulcano 島の噴火にイタリアの地震学者 Mercalli がつけた名前である (例えば、Morrissey and Lastin, 2000)。ブルカノ式噴火の典型が 1950 年代から頻繁に起こっている桜島の噴火である。

ブルカノ式噴火の出現パターンとして 2 通りある。1 つは、ブルカノ式噴火とストロンボリ噴火、そして連続

的な火山灰放出噴火を交互に繰り返すパターンがある。このパターンは諏訪の瀬島や桜島にてよく見られる (Iguchi *et al.*, 2008; 立尾・井口, 2009)。2 つ目は、溶岩ドーム生成がメインで時折ブルカノ式噴火とストロンボリ式噴火をし、連続的な火山灰放出がないタイプで、Santiaguito (例えば、Bluth and Rose, 2004) や Soufriere Hills (例えば、Young *et al.*, 1998) の噴火が代表例で、詳しくは 3-1-5 節のドーム生成タイプ噴火にて述べる。

ブルカノ式噴火に到るプロセスを明らかにすることは火山学において重要な分野の一つであるため、これまでに様々なアプローチにてブルカノ式噴火が精力的に研究されてきた。まず簡単に理論的研究と実験的研究を述べて、観測研究を詳しく述べる。

定常状態を仮定できるプリニー式噴火にくらべて、ブルカノ式噴火は現象そのものが複雑であることから理論的研究は遅れていた。Turcotte *et al.* (1990) は 1 次元ショック・チューブモデルにより、マグマ・蒸気混合流体の火口からの放出速度を数 100 m/s と推定した。さらに、Koyaguchi and Mitani (2005) はマグマ破碎の効果を考慮した 1 次元ショック・チューブモデルにて、火道内圧 10–30 MPa では衝撃波とマグマ放出速度をそれぞれ

600–900 m/s, 300–600 m/s と算出した。Clarke *et al.* (2002) は溶岩ドーム崩壊を伴うブルカノ式噴火を 2 次元数値シミュレーションし、噴火前の 10 時間オーダーでの火道からの脱ガスの程度が、噴煙柱上昇と火砕流流下の様子を支配していることを示した。一方、実験的研究も行われてきており、急減圧によるマグマ破碎が爆発的噴火のトリガーとして重要であることが示された (Alidibirov and Dingwell, 1996)。さらに、マグマ破碎において減圧率依存性が調べられており、気泡数密度の破碎への影響 (Mader *et al.*, 1994) や粘弾性的性質の破碎への影響 (Ichihara *et al.*, 2002) が議論されてきた。

ブルカノ式噴火の観測的研究は、主に地震と空振と地殻変動観測によって行われてきた。ここでは、短期前駆過程と爆発過程に分けて説明する。短期前駆過程は秒単位から数時間単位までの時間スケールを対象とする。短期前駆過程は主に地震と地殻変動連続観測から明らかになってきており、桜島火山はその代表例である。桜島には、現在活動的である南岳火口から北西に 2.7 km のハルタ山と南に 2.1 km の有村に全長がそれぞれ 250 m と 280 m の観測坑道があり、それぞれに伸縮計 3 成分と水管傾斜計 2 成分の地殻変動連続観測装置が設置されている (ハルタ山: 1985 年設置, 有村: 2006 年設置)。そして、南岳の噴火については、短期前駆過程である噴火の 10 分から 7 時間前から火口側隆起の傾斜変動と火口方向およびその直交方向の伸張が見られ、噴火後に火口側沈降の傾斜変動と火口方向およびその直交方向の収縮がハルタ山の地殻変動連続観測にて見られることが報告されている (例えば、Ishihara, 1990; 立尾・井口, 2009; Iguchi, 2013)。また、噴火に先行する地殻変動を引き起こす膨張圧力源の深さは 2–4 km と見積もられている (Ishihara, 1990)。一方、2006 年に再開した昭和火口活動におけるブルカノ式噴火については、前駆する地殻変動と噴火に伴う地殻変動が南岳噴火の地殻変動とは異なるため、地殻変動から南岳噴火と昭和火口噴火の区別が出来ることが示されている (Iguchi *et al.*, 2013)。Iguchi *et al.* (2013) は昭和火口の 2009 年のブルカノ式噴火 (578 個) について有村における地殻変動を調べ、60% 以上の噴火について噴火に前駆した伸縮計の火口方向の短縮と直交方向の伸張を見いだした。一方、噴火に前駆する火口側隆起の傾斜変動が見られるケースは全体の 5% であった。噴火に伴う地殻変動は、噴火に前駆する変動と逆の極性で、短時間での変化である。伸縮計の火口成分と直交成分の極性が異なることは、ソースが浅いことを示しており、噴火に伴う傾斜変化と伸縮計変化からソースの深さを南岳噴火と昭和火口噴火とで比較したところ、それぞれ 2–4 km, 0–1.5 km であった (Iguchi *et al.*, 2013)。昭和火口

の噴火に前駆する地殻変動の継続時間は、1 時間未満が 6 割で、1 時間から 3 時間が 3 割であった。3 時間以上は 1 割で、時には 7 時間を超える場合がある。新燃岳 2011 年噴火でもブルカノ式噴火に先行する山体膨張の傾斜変化が観測されており、地殻変動の継続時間は 0.5 時間から 2.5 時間で、噴火に近づくにつれ傾斜変化の停滞や比較的小さな山体収縮の傾斜変化が見られた (Takeo *et al.*, 2013)。インドネシアの Semeru 火山においては、爆発の 3–30 分前から火口方向の地盤が隆起する傾斜変化を示し、噴火とともに沈降へと反転することが分かっている (Iguchi *et al.*, 2008)。同様の変動は諏訪の瀬島火山においても観測されており、広帯域地震計の変位記録から爆発の 100 秒前から上向きの変位が始まり、爆発開始とともに下向きの変位へと反転する (Iguchi *et al.*, 2008)。Nishimura *et al.* (2013) は諏訪の瀬島火山において傾斜と地震の火口近接観測を行い、小ブルカノ式噴火に前駆する膨張と噴火そして噴火前の微動との関係を明らかにした。連続灰放出に伴う微動の停止は、山体膨張の開始とおおよそ一致し、膨張の継続時間は 1–2 分としている。また、噴火規模と膨張量には、正の相関があることを指摘した。微動停止と膨張の時間帯ではガス放出が停止していることから、微動とガス放出停止と膨張は、噴火前に火口にキャップが出来てガスが直下に蓄積して火道内の圧力が高まることで説明される (Nishimura *et al.*, 2013)。噴火に先行する膨張は噴火直前に加速する場合としない場合がある。理論的研究からマグマ中にガスが生成され、気泡成長に伴い山体膨張が加速することが示されている (Nishimura, 2006; Nishimura, 2009; Kawaguchi *et al.*, 2013)。一方、脱ガスが進んでいる場合か火道上端と下端の圧力差が大きい場合は山体膨張の加速は見られない (Nishimura, 2006; Kawaguchi *et al.*, 2013)。Nishimura *et al.* (2013) がブルカノ式噴火に先行する地殻変動について複数の火山を比較しており、諏訪の瀬島では一定レイトでの膨張 (Nishimura *et al.*, 2013) と加速的膨張と直前の小さい収縮 (Iguchi *et al.*, 2008)、桜島では一定レイトでの膨張と停滞と直前の収縮 (Iguchi *et al.*, 2008)、Semeru 火山では加速的膨張と報告されている (Nishimura *et al.*, 2012)。

爆発過程については主に地震と空振の観測から研究がされている。山腹に複数の広帯域地震観測点が展開されるようになり、爆発地震の波形インバージョン解析が精力的に行われることで明らかになってきた。Ohminato *et al.* (2006) は、浅間山の 2004 年噴火について地震 (爆発地震) の波形インバージョンからシングルフォースを推定した。浅間山の主な 5 つの噴火について、噴出物量 (質量) とシングルフォース値と爆発による空振値には相関

が見られないことを示した。つまり、火道における力の規模（シングルフォース値）が、噴火の規模（噴出物量）に比例しない。このことは、悪天候において噴火規模をリアルタイムに推定することにおいて大きな課題であることを示している。火山性地震の研究では、波形インバージョン解析における周波数帯域は $0.01 \sim 2$ Hz に設定されることが多い。この帯域を励起する力源の規模と噴火規模には、明瞭な相関がないことを示唆しているかもしれない。

Kim *et al.* (2014) はエクアドル Tungurahua 火山の 2010 年の爆発地震を $2 \sim 10$ s の長周期帯域について波形インバージョン解析を行い、深さ 1.5 km にソースがあり、モーメントテンソルの鉛直方向のダイポール成分と下方方向シングルフォースが卓越することを示した。そして、ソースにおける体積変化量を $600 \sim 4,500 \text{ m}^3$ と見積もった。また、モーメントと空振振幅と比較したところ、無相関であることが明らかになった。Dawson *et al.* (2011) はアラスカ Augustine 火山の 2006 年の噴火（噴煙柱高度 $9 \sim 14$ km）の広帯域地震記録から、 $10 \sim 30$ 秒の超長周期成分を抽出して波形インバージョン解析を行った。そして、火口直下 1 km にソースがあり、モーメントテンソルの鉛直方向のダイポール成分が卓越すること示し、震源時間関数から膨張—収縮—膨張というパターンを見いだした。

Iguchi *et al.* (2008) は地震と地殻変動連続観測の桜島、諏訪之瀬島、スメル火山の比較から短期前駆過程と爆発過程の概念的モデルを構築した (Fig. 3)。前段階として、溶岩ドームにより閉塞された火道上部プラグがあり、プラグ直下にガスポケットが形成されている (Ishihara, 1985)。第一段階：マグマ上昇により火道内部の圧力増加。圧力が溶岩プラグの強度を超えたため、プラグからガスが漏れる。第二段階：ガス漏れのため、火道の小収縮。第三段階：ガス漏れによる減圧による過飽和マグマの急激な脱ガスと、それによるマグマの体積と圧力の急激な増加。この段階は、爆発地震の開始に対応しており、体積圧力増加場所は桜島南岳では深さ $2 \sim 3$ km と推定されている (Iguchi, 1994; Tameguri *et al.*, 2002)。第四段階：火道の最上部でのガスポケットの体積増加と増圧、そして火口底にて爆発的噴火開始。ガスポケットを封じていた溶岩プラグはガスポケットの急激な膨張により破壊される。この段階に対応する爆発開始直前の前駆過程については、Yokoo *et al.* (2009) が桜島南岳の噴火において、Yokoo and Iguchi (2010) が諏訪之瀬島の噴火において、空振の先行相を見だし、爆発直前の溶岩プラグの上昇として解釈している。第五段階：火山ガスと火山灰放出による火道内部の減圧と体積減少、それに伴う火道の収

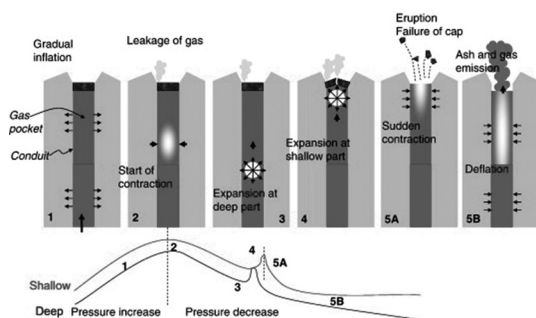


Fig. 3. Process of Vulcanian eruption based on geophysical and gas observations at Sakurajima, Semeru, and Suwanosejima volcanoes. Figure is taken from Iguchi *et al.* (2008). Reprinted from Journal of Volcanology and Geothermal Research, 178/1, Iguchi, M. *et al.*, Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at the Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes, 1–9, Copyright (2007), with permission from Elsevier.

縮。収縮段階は火道浅部の急激な収縮と、火道深部の緩慢な収縮。桜島南岳噴火では火道浅部での急激な収縮は地殻変動 (Ishihara, 1990) と爆発地震 (Tameguri *et al.*, 2002) により確認されている。

桜島南岳の一回のブルカノ式噴火によって放出される火山灰量は、1987 年 11 月 17 日の噴火では $20 \sim 40$ 万トンと推定されている (石原・小林, 1988)。最近の南岳における顕著な噴火は、2012 年 7 月 24 日の噴火（噴煙高度 $8,000$ m）で、火山灰放出量は 25 万トンと推定されている (井口, 2013a)。現在継続中の桜島昭和火口の一回のブルカノ式噴火によって放出される火山灰量は、最大規模であった 2013 年 8 月 18 日の噴火（噴煙高度 $5,000$ m）で地殻変動から 15 万トンと推定されている (井口・為栗, 2014)。

桜島ではブルカノ式噴火後に引き続き連続的灰放出がしばしば見られる。連続的灰放出では、火山性微動を伴う。井口 (2013b) は、桜島昭和火口の火山性微動からスペクトルを議論し、噴出量と相関のある帯域として $2 \sim 3$ Hz を見だし、地震動パワースペクトル値と火山灰放出量との関係を見いだした。そして、火山灰放出量と火山性微動のパワースペクトル、爆発的噴火に伴う圧力源の体積変化量の和を月ごとに比較して、線形の経験式を得た。

Nishimura and Hamaguchi (1993) はブルカノ式噴火の爆発地震の波形を鉛直下向きのシングルフォースにて説明し、浅間山 1983 年噴火と十勝岳 1989 年噴火のデータから力の大きさと継続時間と火口半径とのスケーリング則

を明らかにした。そして、メキシコ Colima 山のブルカノ式噴火の爆発地震についてシングルフォースと継続時間が推定され (Zobin *et al.* 2006a, 2006b, 2009, 2014), Popocatepetl 火山についても同様に推定された (Cruz-Atienza *et al.*, 2001; Zobin *et al.*, 2009)。また、十勝岳 1988 年・1989 年噴火について加藤・他 (2002) は爆発地震の強震動記録からシングルフォースと継続時間を推定した。

ブルカノ式噴火の発生過程については、近年精力的に行われてきた多項目観測から、噴火の前駆過程ならびに爆発過程について詳細が明らかになりつつある。前駆過程については、地殻変動観測から山体膨張と停滞および若干の収縮が複数の火山にて見られ、火山性微動の発生と停止との関係も明らかになりつつある。爆発地震の波形インバージョンでは、共通的なメカニズム解として鉛直方向のダイポールと鉛直下向きのシングルフォースが得られている。また、爆発地震のシングルフォース解析から、震源に働く力の大きさと継続時間のスケールリングが複数について検討され、スケールリング則に関する議論が進んでいる。さらに、地殻変動や地震波動を用いて火山灰放出量推定する方法が考案され、噴火規模の定量化が進んできた。

3-1-3 ストロンボリ式噴火

噴火様式の命名の由来となっているイタリア南部の Stromboli 火山では、1 時間あたり数回から十数回という高頻度でストロンボリ式噴火が繰り返し発生している (例えば、Chouet *et al.*, 1974; Ripepe *et al.*, 1993)。火山ガスとともに玄武岩質マグマの飛沫や赤熱した岩片がジェットとして放出されるという噴火形態はハワイ式噴火と類似しており、発生過程については共通する点も多い (例えば、Parfitt, 2004)。国内では、阿蘇山にてストロンボリ式噴火が見られることが知られており、前節で述べた通り桜島火山においても、噴煙を単発的に放出する噴火やストロンボリ式噴火に似た間欠的な小噴火が火山灰放出を伴いながら継続することもある (立尾・井口, 2009)。一般的に、ストロンボリ式噴火の発生過程は、「スラグ流」で近似される火道内の大きな気泡の上昇と、マグマ表面に到達した大気泡の破裂として理解されてきた (例えば、Vergnolle and Brandeis, 1996; Vergnolle *et al.*, 1996; Ripepe *et al.*, 2002)。Vergnolle and Brandeis (1996) と Vergnolle *et al.* (1996) にまとめられた一連の研究では、火道中を上昇してマグマ表面に至った大気泡の振る舞いについて、理論的および実験的な考察と Stromboli 火山における空振の観測記録に基づき、表面に到達した気泡が作る半球状の液膜が一旦振動したあと、液膜の半径が最小となる際に気泡が破裂して内部のガスが放出さ

れるというモデルが提唱されている。マグマ中での大気泡の形成過程については、マグマ溜まり天井部や火道形状が変化する部分といった物理的境界における気泡の集積が寄与しているとする考え方 (例えば、Jaupart and Vergnolle, 1989; Ripepe *et al.*, 2001)、ゆっくりと上昇するマグマの内部で小さな気泡が集積、合体して大きな気泡が形成されるとする考え方 (例えば、Parfitt and Wilson, 1995) など諸説あり、観測事実や室内実験などに基づいて様々な数理モデルが提唱されているが、現在においても噴火過程が十分に理解されているわけではない。また、Stromboli 火山ではストロンボリ式噴火の他にも、「puffing」と呼ばれる数秒程度で繰り返す小規模なガス放出が継続的に見られるほか (例えば、Ripepe *et al.*, 2002)、山腹からの溶岩流出や非常に希に山麓の集落まで岩塊を飛ばすような「paroxysm」と呼ばれる爆発的噴火も発生することがある (例えば、Barberi *et al.*, 1993)。本節ではストロンボリ式噴火に関する観測研究を主に紹介し、puffing や paroxysm については立ち入らない。

長期間にわたって頻繁に噴火を繰り返しているという Stromboli 火山の高い活動度と、ブルカノ式噴火などに比べて噴火の規模が小さいというストロンボリ式噴火の特徴から、Stromboli 火山では火口の極近傍において地震や空振などの力学的観測や可視・熱映像観測が試みられてきた (例えば、Chouet *et al.*, 1974; Ripepe *et al.*, 1993; Vergnolle and Brandeis, 1994; Ripepe *et al.*, 1996)。これらの先駆的な研究では、ストロンボリ式噴火による物質放出の速度や放出される気相と液相の重量比、噴火と地震や空振との関連が議論された。先駆的研究の 1 つである Braun and Ripepe (1993) は、短周期地震計による火口近傍観測から、空振が地震波データに高周波の信号として重畳すること、空振の到達前に P 波動的な振動特性を示す数 Hz に卓越周期をもつ地震波が現れること、地震波の到着時と空振の到着時の時間差はイベントによって変わること、噴火時のマグマ表面での爆発が地震と空振を同時に励起していると解釈した。

1990 年代に入ると可搬型の広帯域地震計の普及に伴って火口近傍で実験的な観測が行われるようになった (例えば、Neuberg *et al.*, 1994; Kirchdörfer, 1999; Wielandt and Forbriger, 1999; Chouet *et al.*, 2003)、連続的なモニタリングにも広帯域地震計が活用されるようになった (例えば、Giudiciopietro *et al.*, 2009; Genco and Ripepe, 2010)。1990 年代前半に行われた先駆的な広帯域地震観測によって、ストロンボリ式噴火の発生に同期して 10 秒程度の長周期の地震波が励起されていることが見出された。Neuberg *et al.* (1994) は、Stromboli 火山の北山腹で実施した 9 台の地震計による臨時観測から、噴火に伴って

長周期の地震波が励起されていることを示すとともに、その地震波が火口直下の浅い領域へ向かうような引きの極性で始まることを指摘した。Wassermann (1997) はビームフォーミング解析により、Kirchdörfer (1999) は地震波の振動軌跡から、Wielandt and Forbriger (1999) は地震記録に含まれる傾斜成分を用い、いずれも Neuberg *et al.* (1994) と同様に火口直下の浅い領域から長周期の地震波が放射されていることを示した。Chouet *et al.* (2003) は 1997 年に Stromboli 火山の火口を取り囲むように配置した 23 台の広帯域地震計で短期間の臨時観測を実施し、この長周期の地震波について震源位置とメカニズムを探索する波形インバージョン解析を行った。観測期間中にとらえられた長周期の地震波は大きく 2 種類に分類され、それらは火口から北西へ約 160 m、深さ 220 m から 260 m (海拔 480 m から 520 m) に位置する 2 つの傾いたダイクがストロンボリ式噴火に伴って開閉することで地震波が励起されていると解釈した。本節の以降では、多くの研究論文に倣ってこの長周期の地震波を“very-long-period signal (VLP)”と呼ぶことにする。Chouet *et al.* (2003) までは報告されてきた VLP の観測事例や表面での噴火現象との対応から、Stromboli 火山の VLP はいわゆる爆発地震の一種と考えられてきた。

短期間の臨時観測から示されたこれらの結果に対し、Marchetti and Ripepe (2005) は、Stromboli 火山における 2002 年 12 月に始まった溶岩流出活動期とそれ以前のやや長期間の VLP 活動について報告している。山腹からの溶岩流出前に山頂火口で見られていたストロンボリ式噴火は、溶岩流出の開始とともに消失する一方で、VLP の活動は変わらず継続していた。同一観測点で記録した溶岩流出期の VLP と流出前の VLP の波形を比較した結果、鉛直断面の振動軌跡は溶岩流出期により大きな傾斜角を持ち、VLP の震源が深くなったことを示唆していた。また溶岩流出活動の終盤には傾斜角が小さく(震源が浅く)なっていく変化が認められた。Giudiciapietro *et al.* (2009) は 2007 年 2 月末に始まった溶岩流出活動前後の VLP について、13 点の広帯域地震計記録を用いて精査し、やはり溶岩流出活動の開始とともに VLP の震源位置が深くなったことを示唆する振動方向の変化を見出した。Ripepe *et al.* (2015) は、同じ 2007 年 2 月からの溶岩流出活動について溶岩流出率を説明しうる数理モデルを提示する中で、数理モデルに基づいて推定される火道内のマグマ残量の時間変化と VLP の振動方向の時間変化に強い相関が見られること、溶岩流出期を含む 2006 年から 2013 年の VLP の振動方向の時間変化と熱赤外カメラの映像から追跡した火口縁の標高変化に強い相関が見られることを示した。これらの最近の研究成果は、火

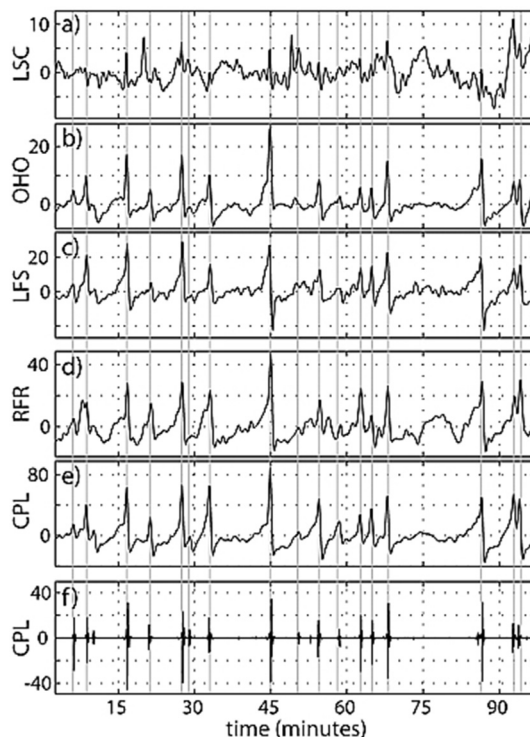


Fig. 4. Inflation-deflation ground deformation (nrad) cycles recorded at the borehole type tilt stations (a), (b), and (c), and derived from the broadband horizontal seismic signal (d) and (e). (f) Associated ground displacement (μm) in the VLP seismic band. Figure is taken from Genco and Ripepe (2010).

山の活動状態にあわせて VLP の震源位置自体が時間的に大きく変動していることを強く示唆している。主に短期間の観測事例に基づいて導かれてきた VLP の従来の解釈では、長期間の連続観測から明らかになった震源移動等の特徴は説明しにくいようである。

VLP よりもさらに長い周期の変動として、Genco and Ripepe (2010) は山頂から山腹に展開したボアホール傾斜計と広帯域地震計の記録から、ストロンボリ式噴火に伴う膨張-収縮現象を見出した。個々のストロンボリ式噴火の 200 秒ほど前から山頂方向の隆起を示す変化が見られるようになり、最後の 20-30 秒で隆起変動が加速する。変動量は大きい観測点でも 100 nrad 未満である。噴火が起こると山頂方向が急激に沈降し、噴火のたびに同様の膨張-収縮を繰り返す (Fig. 4)。スタックした傾斜変動記録から、噴火前の約 200 秒間の隆起が $t^{1.5}$ に比例することを指摘し、Nishimura (2009) から予測されるような噴火前のマグマの上昇を反映していると解釈した。

Kawaguchi and Nishimura (2015) は, James *et al.* (2008) による気泡の上昇モデルから期待されるストロンボリ式噴火に先行する傾斜変動を, 3 次元の地形を考慮した数値計算により検討した. その結果, Genco and Ripepe (2010) が観測したような噴火に向かって加速する傾斜変動ではなく, 気泡が上昇することによって生じる火道内の減圧の効果が噴火直前に現れることが確認された. そのため観測された傾斜変動を説明するには, 気泡の上昇モデルについての再検討もしくは異なるメカニズムの導入が必要であると述べている.

一方, ストロンボリ式噴火の表面活動については, 空振や映像, レーダーなどを用いた観測研究が盛んに行われている. 特に Stromboli 火山では複数の火口からストロンボリ式噴火や puffing が起こるため, ガス放出が起きている火口を自動的に判別する目的で, 空振計の小規模アレーを用いた観測が早くから行われてきた (Ripepe and Marchetti, 2002; Johnson, 2005). 現在では常設の空振計アレーのデータをルーチ的に自動処理するシステムが構築され, 研究はもとより火山活動の推移把握や防災情報の発信にも役立てられている. Chouet *et al.* (1974) や Ripepe *et al.* (1993) が推定したストロンボリ式噴火の物質噴出速度は, ドップラーレーダー (Hort *et al.*, 2003, Scharff *et al.*, 2008), 熱動画 (Patrick *et al.*, 2007, Harris *et al.*, 2012) などを用いて追試が行われ, Delle Donne and Ripepe (2012) による 50 Hz サンプリングの高速熱映像を用いた観測でも最大で 200 m/s 程度であり, 超音速にはなっていないと考えられてきた (Fig. 5). 最近では高速カメラを用いた観測が行われるようになり, Taddeucci *et al.* (2012) は粒子追跡から最大で 400 m/s を超える噴出速度やを見積もっている. また Genco *et al.* (2014) は画像輝度の時空間変化から圧力波の伝搬速度や方向を推定し, 噴出の中心軸付近に音速を超えるガス流があると推定した. 一方, Goto *et al.* (2014) は, 高周波へ帯域を広げて取得した空振記録に超音速ジェットの空振に類似した非対称性が認められることと, 可聴域高周波音の出現タイミングが最初の圧縮波が減圧する前であることに基づき, ストロンボリ式噴火の物質放出中にも超音速の現象が含まれており, 空振は気泡膜の振動ではなく破裂時のマグマ表面の隆起で放射されていると推測した. これらの最近の研究事例は, 表面現象の時空間的な微細構造をとらえることで, 従来の観測では見出せなかった特徴の抽出に成功している.

3-1-4 ハワイ式噴火

Hawaii 島の火山活動に代表される玄武岩質溶岩の噴火様式の一つで, 数時間以上にわたって継続する大規模な溶岩噴泉活動で特徴づけられる. Hawaii 島やイタリ

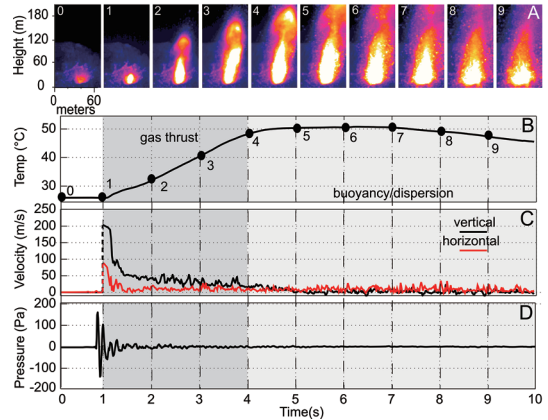


Fig. 5. Thermal and acoustic signature of a Strombolian eruption (May 5, 2008, 16 : 38 UTC, NE crater). (a) Snapshots of the eruption from the NE crater taken at 1 s intervals. (b) Temperature of the explosion integrated in the field-of-view. (c) Vertical and horizontal velocities derived by thermal decomposition analysis. (d) Infrasound associated with this explosion has been corrected for the theoretical reduced time at the vent and shows that the acoustic waves are generated before the gas/ash mixture comes out of the vent. Figure is taken from Delle Donne and Ripepe (2012).

ア・Sicilia 島の Etna 山で見られる溶岩噴泉活動は, しばしば大規模なダイク貫入と溶岩流出イベントに先だって発生してきたことが報告されている (例えば, Parcheta *et al.*, 2012; Bonaccorso *et al.*, 2011a). 国内では 1983 年の三宅島や 1986 年の伊豆大島の噴火で溶岩噴泉活動が見られた. Parfitt (2004) は溶岩噴泉現象の発生過程に関する理論的研究についての比較検討を行い, Wilson (1980) や Wilson and Head (1981) を起源とする “The rise speed dependent model” (RSD モデル) と, Vergnolle and Jaupart (1986) や Jaupart and Vergnolle (1988), Vergnolle and Jaupart (1990) を起源とする “The collapsing foam model” (CF モデル) の大きく 2 つの立場があると述べている. RSD モデルは火道内におけるマグマの上昇スピードが気泡の成長や合体および脱ガス様式を決めるというもので, マグマの上昇速度が 0.01–0.1 m/s を上回ればハワイ式噴火になり, 遅い上昇速度ならストロンボリ式噴火になると予測する (Parfitt and Wilson, 1995). マグマの上昇速度が速い場合, 火道内のマグマはマグマ中の気相が液相と大きな相対運動をする前に地表に噴出するため, RSD モデルでは気相と液層の相対運動を考えない. マグマの上昇中には, 気泡の生成や拡散と, 減圧による気泡の成長が起こり, 気相の体積分率が上限 (例えば 60–

95%)を上回るとマグマが破碎する。破碎後は上昇するマグマと火道壁との摩擦が大きく低下するためガス-マグマ混合物の上昇速度はますます大きくなり、最終的に地表での噴出速度は100 m/s程度に達する(Wilson and Head, 1981)。このようなメカニズムで生じる連続的なマグマ放出がハワイ式噴火であるとしている。反対にマグマの上昇速度が遅い場合は、マグマ中の気相は液相よりも速い速度で液相中を上昇する。気泡のサイズが大きいため上昇速度が速いため、速く上昇する大きな気泡は上方にある小さい気泡を取り込みながら成長する。その結果として大気泡が形成され、ストロンボリ式噴火が生じるとしている。一方のCFモデルは、マグマ溜まりなどの天井部に集積した気泡が合体して火道内に流れ込み、気相がマグマに対して相対速度を持って上昇するという考え方が基本となっている。Jaupart and Vergnolle (1988)は室内実験に基づいて、火道内の流れがスラグ流となる場合にはストロンボリ式噴火となり、環状流(火道壁に接触した環状マグマの中心部を気相が上昇する)となる場合にはハワイ式噴火になるとしている。Parfitt (2004)は、どちらのモデルにも致命的な欠陥はないとしながらも、1983年から1988年に発生したKīlauea火山Pu'u Ō'ō噴火に際して得られた各種データに両モデルを適用すると、ガス成分比などCFモデルでは説明しづらい点があると述べている。

いずれのモデルが溶岩噴泉現象の本質を反映しているかはともかく、Parfitt (2004)が議論したように多くの研究者から受け入れられる理論的な噴火モデルは既に提示されている。その一方で、観測に基づいて噴火モデルを構築したり、既存の噴火モデルを評価したりするような観測研究事例は多くない。

Etna山では2000年以降も溶岩噴泉活動が繰り返し認められており、観測事実に基づいてモデルの検討が進められている。噴泉活動は、2000年に66回のイベント、2001年に15回のイベント、2007年から2008年に7回のイベント、2011年から2013年に38回のイベントがあった(Bonaccorso and Calvari, 2013)。これらはいずれも、より大規模な溶岩流出イベントに先だって発生しており、その前兆過程と考えられている。Etna山の溶岩噴泉活動は急に始まるのではなく、小規模な溶岩流噴出から数時間程度続くストロンボリ式噴火に移行した後に現れる(Bonaccorso et al., 2013)。このような観測事実は、理論モデルでも検討されているように、ストロンボリ式噴火から溶岩噴泉活動への遷移過程が噴火過程の理解において極めて重要であることを示している。

Etna山における溶岩噴泉活動については、CFモデルの方が観測事実を説明しやすいとされている。Allard et

al. (2005)は2000年6月14日にEtna山頂の南東火口で発生した溶岩噴泉活動について、火山ガスの分光解析を行った。そして噴泉活動で放出されたガスのCO₂/S比やS/Cl比について、1.5 kmほどの深さでマグマから分離した状態で存在していたはずであり(CFモデル的)、上昇と同時に生じる脱ガス(RSDモデル的)では説明できないと結論づけている。2008年5月10日に同じ南東火口で発生した山腹大規模噴火直前の溶岩噴泉活動については、Bonaccorso et al. (2011a)が噴出物の組成分析を含む多項目観測の結果を紹介し、やはりCFモデルの方が適切だと述べている。この活動は2008年5月13日から2009年7月まで続く大規模溶岩流出の直前に起こった噴火で、噴出量は $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ 程度と見積もられ、2007年から2008年に繰り返された噴泉活動の中でも最大であった。噴泉活動ごとに得られる噴出物の化学組成の時間変化からは、時間とともに噴出物の進化が進んでいることが示唆され、大規模噴火の初期に最も進化したマグマが噴出した。この結果は溶岩噴泉が新たに深部から上昇してきた未進化なマグマの発泡によって生じているとする考え方(RSDモデル)とは合致しない。これと同様の議論は2000年に繰り返された噴泉活動の噴出物に関する研究でも行われている(Andronico and Corsaro, 2011)。地球物理的な観測データについては、5月10日の噴泉活動の1週間くらい前からLP地震の回数や振幅に増大が認められた。その震源は南東火口の下の高さ2000 m付近に求められる。火山性微動の振幅分布の時間変化からは、噴泉活動の開始に合わせて微動のRMS振幅が急増したこと、および微動の震源が噴泉活動が起こった南東火口の直下の浅い部分に移動したことが明らかになった(Fig. 6)。傾斜計には山頂方向の沈降を示す信号が現れ、 $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ の体積減少を与えた茂木モデルを仮定すると、海面下3-4 kmに変動源を考えると説明できることが分かった。この他にも連続重力観測値に現れた変化は低密度のガスに富んだマグマ(気泡層)の移動で説明できるとしている。その後の大規模溶岩流出活動期の多項目観測の成果については、Bonaccorso et al. (2011b)などに紹介されている。

フランス領レユニオン島のPiton de la Fournaise火山(PdF)もハワイ式噴火が見られる火山として知られている。Battaglia and Aki (2003)はPdFで取得された火山性地震や崩落に伴う振動の発生位置と震源強度を、観測された地震波の高周波振幅の空間分布を元に簡便に推定する方法を提案した。この方法はP相やS相といった位相の情報を使わないため、微動のような連続的な振動に対しても適用でき、Battaglia and Aki (2003)は噴火位置の即時同定にも応用できる可能性があることを示した。

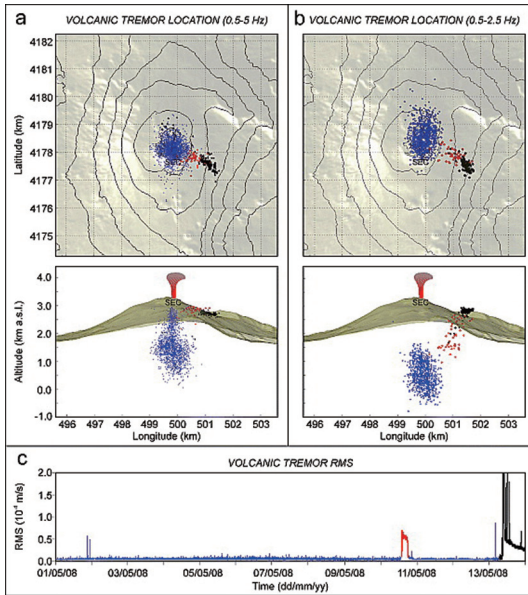


Fig. 6. (a) Wide-band tremor (WB) and (b) narrow-band (NB) volcanic tremor source locations in map view and cross section, and (c) RMS seismic amplitude on May 11–13, 2008. The colors of the dots in (a) and (b) indicate the different time intervals shown in (c). The red and black colors correspond to the May 10, 2008 lava fountain and the days of very rapid processes during the 2008–2009 eruption, respectively. Figure is taken from Bonaccorso *et al.* (2011 a).

Battaglia *et al.* (2005a, 2005b) は 1998 年以降の噴火活動で得られた地震波データにこの手法を適用し、5–10 Hz の帯域で振幅を評価した場合には表面活動との位置の対応が良いこと、微動振幅の積算値が溶岩噴出量を良く反映していることを示した。PdF では、その後 2007 年 4 月に山頂の Dolomieu 火口の陥没と側噴火口からの溶岩流出という大規模な活動があった。地震計、傾斜計、GNSS、可視映像などのデータに基づいて、マグマの蓄積から火口陥没と溶岩流出にいたった過程の解明が進められている (例えば、Staudacher *et al.*, 2009)。陥没進展期に 2000 年の三宅島噴火で見られたのと同様な鋸歯状の傾斜変動や辺長変化が認められていることは非常に興味深い (例えば、Michon *et al.*, 2011)。また最近では、Hibert *et al.* (2015) が PdF における 2010 年 1 月に発生した噴泉活動と溶岩流出活動について、地震、空振、写真測量、火山ガスなどの多項目観測から溶岩流出率の連続的な評価を試みている。

以上見たように、ハワイ式噴火の噴火過程については、物理的な多項目観測はマグマ溜まりの位置や変動量、大

規模溶岩流出にいたるダイクの貫入過程を明らかにするという観点で成果を上げている。しかしながら、噴泉活動自体を理解する上で重要な物理モデルの評価という観点では、噴出物分析や火山ガス分析といった研究手法からの検討が専らである。このことは、モデルの評価において鍵となる火道内の気相の振る舞いに関する情報を物理観測によって得ることの難しさを表している。

3-1-5 ドーム生成タイプ噴火

安山岩質から流紋岩質の高粘性マグマがもたらす噴火活動のうち、気泡流としてゆっくりとマグマが地表に放出される場合には溶岩ドームが生成される。溶岩ドームの生成活動中には、溶岩ドームが重力的に不安定となってドーム崩壊型の火砕流が発生することもある。爆発的噴火 (ブルカノ式噴火) が発生することもある。ここでは溶岩ドームの生成や溶岩ドームを有する火山で見られる爆発的噴火の前駆活動に注目した最近の研究事例に絞って取り上げる。溶岩ドームの観測研究では、地震発生率や傾斜変動の数時間単位での周期的な変化 (例えば、Voight *et al.* 1999)、分オーダーでの繰り返しの地震発生 (例えば、Iverson *et al.*, 2006)、地震波の単色のスペクトル構造 (例えば、Neuberg *et al.*, 2000) など、多様な周期性を持つ現象の発生が数多く報告されてきた。この 10 年では、これらの周期性に注目して溶岩ドーム噴火の物理過程を議論する観測研究が目につく。さらに長い数週間から年単位の周期性については、Melnik and Sparks (1999, 2005) など 1 次元火道流モデルに基づく理論的考察もなされているが本稿では触れない。

国内での溶岩ドーム噴火の最近の事例は、1991 年から 1995 年まで続いた雲仙普賢岳の活動である。この噴火活動に際して地震観測や地殻変動観測のほか比抵抗探査や衛星熱赤外観測も行われ、一連の成果は *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 誌の特集号 (1999 年) にまとめられている。普賢岳の活動に限らず、溶岩ドーム噴火では波形が相似となる地震群が特徴的に現れることが知られている (例えば、Okada *et al.*, 1981)。Umakoshi *et al.* (2008) は普賢岳のドーム生成期全体を通じた地震活動について、58 万個の地震を高周波 (HF) タイプ、中間 (MF) タイプ、低周波 (LF) タイプに分類し、ドーム成長の時期との対比を行うと共に、相互相関を用いた相似地震のグループ分けを行った。HF タイプは 1991 年 5 月の溶岩ドーム出現期と 1993 年 11 月以降の内生的ドーム成長が卓越する時期に特徴的に認められるのに対し、外生的ドーム成長が卓越した 1991 年 6 月から 1993 年 8 月までは LF タイプが支配的で、1–2 ヶ月おきに地震活動の増減が認められた。単一の相似地震群の活動期間はおよそ 2 週間以内で地震活動度の強弱とは関

係がなく、HF や MF タイプの地震群では複数の相似地震群が同時に活動するのに対し、LF タイプの地震群では相似地震群が次々と入れ替わるように現れるという活動様式の違いが明らかになった。さらに Umakoshi *et al.* (2011) はドーム出現期の 1991 年 5 月の地震活動に着目し、HF タイプの地震活動が 1-2 時間周期で増加するのと同期して山頂方向上がりの傾斜変動が認められることを報告した。また、Hornby *et al.* (2015) は普賢岳の活動の最終期に見られた周期的な地震活動を伴う溶岩尖塔の成長過程について、岩石の滑り実験と組織観察に基づいた検討を行った。そして、一定の深度より深い領域では摩擦熱による岩石の溶融が起こると指摘し、尖塔の成長は深さ方向に変化する滑り摩擦に支配されると述べている。普賢岳の溶岩ドーム成長の噴火では、溶岩ドームや火道の内部で地震の発生が認められる。従来は高温のマグマ内部では脆性破壊が生じないと考えられてきたが、最近では 600℃ を超えるような高温であっても、高粘性マグマが溶岩ドーム成長などの大きなひずみ速度を持つ場合には、メルトの破断やクリープによる変形で地震が発生すると指摘する研究も報告されている（例えば、Goto, 1999; Tuffen *et al.*, 2008）。

普賢岳の活動以降、国内では溶岩ドームの成長を伴う噴火活動が発生していないこともあって、溶岩ドーム噴火に関する観測研究は行われていない。一方、海外では溶岩ドームの生成が継続、再開している火山があり、精力的に観測研究が行われている。2009 年に発生したアメリカの Redoubt 火山の活動では、溶岩ドームの生成とともに爆発的な噴火の発生が報告されている (Bull and Buurman, 2013)。Hotovec *et al.* (2013) は複数回の爆発的噴火に先立って、地震波のスペクトル構造が時間とともに高周波化し、噴火の 30 秒ほど前には静穏化したように見えるという観測事実を示した。同様のスペクトル構造の時間的変化は、Redoubt 火山と同様に火口に溶岩ドームを頂くイギリス領西インド諸島 Montserrat 島の Soufrière Hills 火山でも報告されている（例えば、Neuberg, 2000）。Dmitrieva *et al.* (2013) は Redoubt 山の地震波スペクトルの時間変化について断層運動の摩擦構成則 (Rice *et al.*, 2001) に基づいた数値的検討を行った。最終的な破壊過程である爆発的噴火に向かってひずみ速度が増加していくと、滑り速度の増大する周期が時間とともに短くなることを示し、スペクトル構造の時間変化が説明できるとした。一方、Jellinek and Bercovici (2011) は同様の地震波スペクトル構造の生成メカニズムについて異なるモデルを提唱した。高粘性のマグマが火道内を上昇するとき、火道壁に近い部分ではせん断ひずみが大きくなり気泡の変形や連結が効果的に発生して空隙率が高くな

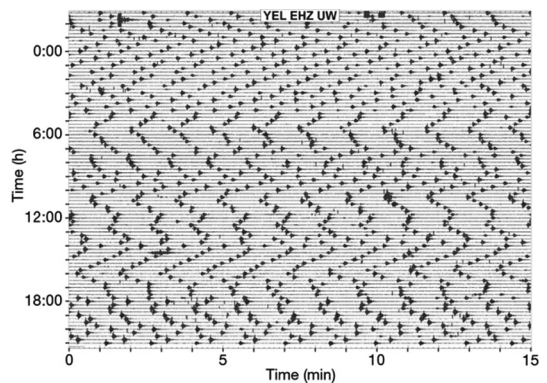


Fig. 7. Drumbeat earthquakes recorded at Mount St. Helens on December 1-2, 2005. Earthquakes repeat quite regularly. Figure is taken from Iverson *et al.* (2006). Reprinted permission from Macmillan Publishers Ltd: [Nature] Iverson, R.M. *et al.*, 2006. Nature 444: 439-443. Copyright 2006.

る。この高空隙率の円管状の層が火道壁と火道内の高粘性マグマの間でバネのような役割を果たすために、火道内のマグマが水平方向へ運動すると平衡状態へ戻そうとする振動が起こると述べている。

同じくアメリカの St. Helens 火山において 2004 年 10 月に再開した溶岩ドーム生成を伴う火山活動では、ハイブリッド型の火山性地震が 30 秒から 300 秒の間隔で周期的に繰り返し発生しているのが観測された。Iverson *et al.* (2006) はこの周期的な地震活動を ‘drumbeats’ と名付け (Fig. 7)、火道の内圧で成長するドームの周縁部で繰り返し発生する stick-slip が地震を起こしていると仮定した力学的モデルを提案し、その振る舞いを検討した (Fig. 8)。適当なパラメータを選択すると St. Helens 山で観測されたような数 10 秒おきの繰り返し滑りを再現でき、その場合の火道内圧力の変動幅は圧力絶対値の 0.02 % 未満と小さいことが分かった。Kendrick *et al.* (2014) はこの stick-slip モデルについて検討するため、St. Helens 火山や Soufrière Hills 火山の溶岩を用いてドームの成長を模した岩石滑り実験を行った。そして、滑りに伴う溶岩の摩擦融解が生じること、および生成したメルトが滑りを減速させる働きを示した。

Soufrière Hills 火山の 1997 年 6 月の活動で見られた数時間おきの周期的地震活動や傾斜変動について、Neuberg *et al.* (2006) はドームの膨張を示す傾斜変化と地震活動の増大が同期していることから、火道内マグマの繰り返し滑りが地震を起こしていると考えた。同じ活動について、Costa *et al.* (2012) は高分子化合物の挙動を模したドーム成長の力学的モデルを提唱し、火道壁面と火

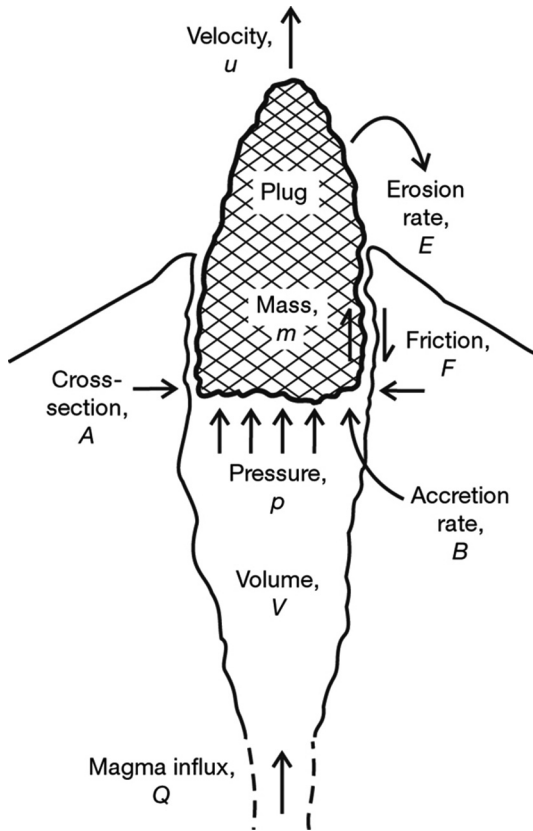


Fig. 8. Diagram of stick-slip dome growth model proposed by Iverson *et al.* (2006). Figure is taken from Iverson *et al.* (2006). Reprinted permission from Macmillan Publishers Ltd: [Nature] Iverson, R.M. *et al.*, 2006. Nature 444: 439–443. Copyright 2006.

道内マグマとの stick-slip で数時間の周期的活動が表現できることを示した。一方、Michaut *et al.* (2013) は同様の周期的活動について、火道内の揮発性物質に富んだマグマの2層流としての振る舞いを検討し、火道内に高空隙率と低空隙率の領域が交互に現れることで活動の周期性が生み出されているとしている。ここまで述べたように、溶岩ドームの生成機構については地震活動や地殻変動観測の観測事実や岩石摩擦実験などの成果を加えて、周期性に注目したいろいろな力学的モデルが提唱されてきた。しかしながら、周期性を生み出す鍵となる物理過程についても諸説あるというのが現状であり、溶岩ドーム成長の多項目観測や室内実験、岩石組織観察などに基づく更なる研究の発展が期待される。他にも、溶岩ドーム噴火の長期的なマグマ噴出率の時間変化に着目し、地殻変動データとの対比を意識した力学的モデルも提唱され、2004年以降の St. Helens 火山の観測データに適用さ

れている (Anderson and Segall, 2011)。

グアテマラの Santiaguito 火山では、隣接する山体から活動中の溶岩ドームを見下ろせるという利点を生かして、映像とその他の物理観測量を対比させる多項目の観測研究が行われている。Bluth and Rose (2004) は2002年から2004年に行った繰り返し映像観測に基づいて、小規模噴火のうちおよそ半分の事例でドーム周縁に発達した円形の割れ目から物質放出が起こっているという重要な事実を見出した。この発見は、高粘性マグマが上昇する火道ではせん断応力が高い火道壁の近傍に気泡層が発達しているとする Jellinek and Bercovici (2011) のモデルの根拠の一つとなっている。Johnson *et al.* (2008) は映像解析から、小噴火に際してドームの中心から周縁部に向かってドームの隆起・拡大の変形が進行することを示し、小噴火時に励起される低周波地震はドーム隆起の反作用である 10^9 N 程度の下向きシングルフォースで説明できるとした。さらに Johnson *et al.* (2009) は2009年1月に取得した広帯域地震計、空振計、ビデオ映像の同時記録から、小噴火の290秒ほど前から火口の発光とジェット音の放射が増大し始め、引き続いて傾斜変動と思われる信号が地震記録に表れることを示した。噴火の約2分前から、空振に0.43 Hzの単色振動と地震記録に0.43 Hzとその高調波からなる微動が記録された。小噴火とともにジェット音の放射は停止し、数10 Hzから70秒までの幅広い周波数帯域の空振と地震動が励起されていた。Johnson *et al.* (2014) では2012年1月に傾斜計を追加した観測を実施し、1月10日から16日には数10分程度で繰り返す非常に周期的な傾斜変動が見られたこと、溶岩ドームの赤熱（強いガス放出を反映）が山体の収縮を示す傾斜変動と同期していること、地表の下約300 mで発生する VLP 地震が小噴火による音波放出よりも約6秒先行して励起されていること（ガスの上昇速度は50 m/sと見積もられる）などを報告し、Holland *et al.* (2011) が SO_2 の紫外線画像観測から見出したガス放出の周期性と調和的であると述べている。

これらの他、インドネシアの Merapi 火山、メキシコの Colima 火山などでは映像の pixel offset 解析や熱映像解析から溶岩ドームの成長や変形、流下を詳細にとらえる研究が報告されている (Walter *et al.*, 2013a, 2013b)。Soufrière Hills 火山では、傾斜変動に同期した地震群の検討 (Green and Neuberg, 2006)、長期にわたる火山構造的な地震の震源移動やメカニズム変化 (Roman *et al.*, 2008)、地上レーダーによるドーム成長と崩壊の追跡 (Wadge *et al.*, 2008)、ひずみ記録を用いたマグマ供給系の検討 (Hautmann *et al.*, 2013) など、多様な観測研究が進められている。

3-2 マグマ・水蒸気噴火および水蒸気噴火

マグマ・水蒸気噴火や水蒸気噴火（爆発）の発生過程には、高温のマグマや火山ガスと地下の浅い部分に存在する地下水などの低温流体との相互作用が大きく関与していると考えられている（例えば、Germanovich and Lowell, 1995）。マグマとの接触や間接的な熱の供給により温められた地下水は高温・高圧状態となり、何らかの原因で蒸発を始めると加速的に膨張して爆発にいたる。このように外来水が関与して発生する水蒸気噴火に類似した現象は、工学的な分野でも「蒸気爆発」として知られ、高温高沸点液体と低温低沸点液体の相互作用 (FCI) モデルや平衡状態にある水と水蒸気が高速度な爆発現象を引き起こす平衡破綻型爆発モデルなど、いくつかのモデルが想定されている（谷口, 1996）。実際の火山を想定した水蒸気噴火のモデルは極めて少ないが、その一つに Germanovich and Lowell (1995) による理論的考察がある。著者らは地下のある深さに存在する水-水蒸気の境界層にダイクが貫入し、ダイクからの熱供給によって上部の水が過熱されるという状況を想定した。上部の母岩内に存在する水はダイクからの熱によって対流し、母岩内部にある流体で満たされた既存のクラック内の水を加熱する。加熱によって水が膨張することでクラックが破壊し、その破壊が複数のクラックに伝搬した結果、最終的に破壊が火口に到達して噴火にいたるというアイデアである。このモデルからは、水蒸気爆発が起こりうる環境としては、地下水層があること、周囲の母岩に流体で満たされたクラックがあること、そしてそこにダイクが貫入することが示唆される。

水蒸気噴火（爆発）の発生過程についての地球物理学的研究の進展は2つのアプローチでなされている。1つは、浜口・植木 (2012) や浜口・他 (2014) の過去の大規模水蒸気噴火について文献調査などから地球物理学的情報を抽出するアプローチで、本稿ではこれ以上は述べない。もう1つは、本稿において対象とする近年の火口近接の複数項目観測に基づくアプローチであるが、研究事例はマグマ噴火に比べて圧倒的に少なく、観測項目は地震と地殻変動および一部の全磁力や熱映像の連続観測に限られる。また、本稿では噴火現象そのものに限定せず、水蒸気噴火に前駆した噴火の準備過程に相当する火山活動の観測研究事例も紹介する。噴火に限定するとあまりにも事例に限られるうえに、水蒸気噴火の準備過程についての研究も多くないためである。

水蒸気噴火の前兆現象についてまとめた有名な論文として、Barberi *et al.* (1992) が挙げられる。115の噴火事例のうち、71例で前兆現象があったと報告されている。前兆現象として最多なのは地震観測によるものである

が、地震観測自体が火山目的ではなくリージョナルネットワークのものであったケースが多い。さらに言えば、この論文がまとめられた頃の火山観測では火口近接観測は希であったと察する。

まず、マグマ・水蒸気噴火および水蒸気噴火に伴った地震観測による研究について紹介する。Maeda *et al.* (2014) は、フィリピンのMayon火山にて2013年5月7日に発生した水蒸気爆発に伴う地震の波形インバージョン解析を行い、震源は火口から下240mで、シル状クラックの開閉と下向きのシングルフォースの組み合わせを最適なメカニズムとして推定した。また、推定された震源時間関数は、クラックは最初に膨張しそして収縮であり、シングルフォースはインパルス的である。クラックの体積変化量は $6.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ である。シル状クラックは帯水層内に形成され、クラック内で水が急激に気化し、そして噴出することで収縮し、噴出の反作用として下向きシングルフォースとなったと解釈した。Jolly *et al.* (2010) は、ニュージーランドのRuapehu火山における広帯域地震観測から2007年9月25日の水蒸気噴火（噴煙高度4,600m）を捉えた。噴火の10分前から小振幅の火山構造的性 (VT) 地震が発生し、そして連続微動に遷移して噴火に至った。超長周期 (VLP) は噴火の10分前と噴火の直前、そして噴火時に見られ、波形インバージョンから噴火に先行するVLPの震源は火口直下の深さ3-7kmでメカニズムはシル状クラック、そして噴火時のVLPは震源が火口直下深さ1.5kmでメカニズムはシングルフォースと推定された。シングルフォースで噴火の際の火砕物の噴出方向とほぼ逆向きで、噴出による反作用力と解釈した。MayonとRuapehuのケースを比較すると、観測されたVLP地震のメカニズムはシル状クラックと噴出の反作用を表すシングルフォースと共通である。一方、深さはMayonが火口下0.2kmで、Ruapehuが3-7kmと大きな開きがある。

Kato *et al.* (2015) は、御嶽山2014年時の地震波形にMatched Filter法 (Gibbons and Ringdal, 2006) を適用して、噴火10分前に火山構造的性 (VT) 地震が火口直下の海拔ゼロ付近に発生し、そして噴火直前には海拔上1kmまで上昇するとともに、北北東-南南西方向に震源が拡大したことを示した。この震源の上昇と拡大とともに地震の振幅が増大し、ピークにて噴火が発生した (Fig. 9)。そして、噴火後もVT地震は海拔上0.5~1kmにて発生し続けた。また、この地震の振幅増大と震源拡大と同時に山頂から3kmの地点の傾斜計にて噴火10分前から噴火直前までに $3 \mu\text{rad}$ の山頂上がりの変化が観測された。そして、噴火後山頂下がりに転じたが、噴火に伴う山頂下がりの変化量は噴火直前の山頂上がりの変化量の

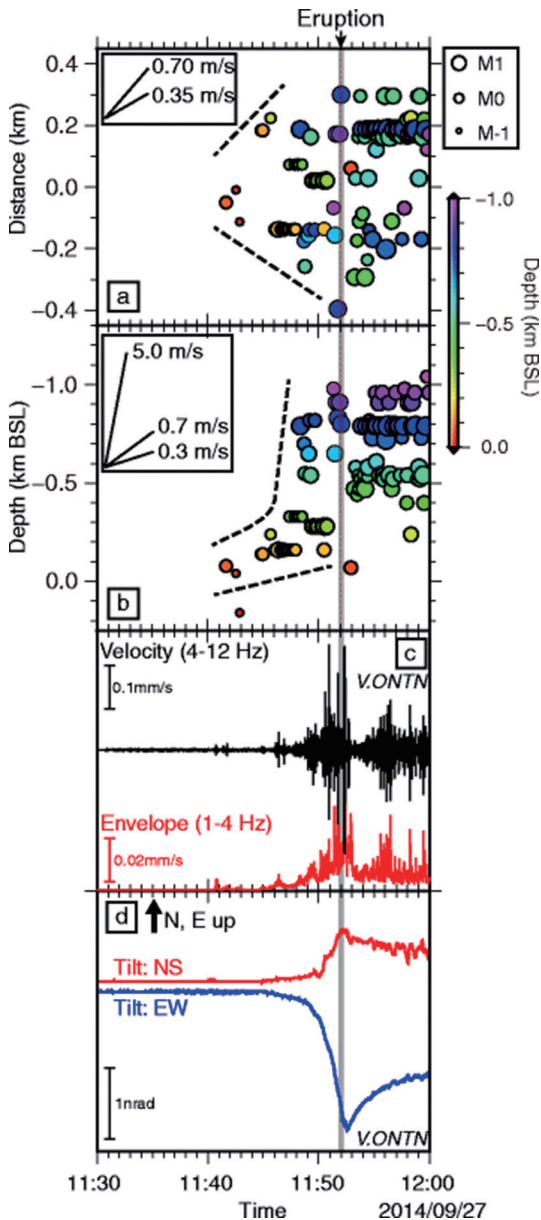


Fig. 9. An episode of tremor that contained precursory and co-eruptive stages of the 2014 Ontake phreatic eruption. The tremor is associated with a significant tilt change that shows inflation at the precursory stage and deflation at the co-eruptive stage. Locations of detected seismic events during the tremor are projected on (a) horizontal and (b) vertical planes. Circles are scaled to magnitude. (c) Bandpass-filtered waveform between 4 and 12 Hz (black line) and envelope between 1 and 4 Hz (red line). (d) Observed tiltmeter records. NS and EW components denote northward and eastward ground-up components, respectively. Figure is taken from Kato *et al.* (2015).

約半分であった。御嶽山と Ruapehu 火山を比較すると、水蒸気噴火に至るまでに VT 地震が 10 分前から群発し始め、そして、連続微動になり噴火直前に振幅が大きくなる点が共通である。このプロセスは地表での Outburst (噴火) に至るまでの地下での水蒸気爆発を反映していると思われる。

次に、マグマ・水蒸気噴火および水蒸気噴火に先行した現象について、地震や地殻変動連続観測による研究を紹介する。御嶽山は 2007 年 3 月に極小規模な噴火が発生したが、2006 年 12 月から発生した山頂直下の群発地震活動とそれに伴う広域の地殻変動が観測されていた。そして、Nakamichi *et al.* (2009) は 2007 年 1 月 25 日に発生した VLP 地震の波形インバージョン解析を行った。その結果、山頂直下の海拔上の 0.6 km にある傾斜したクラックが最適なメカニズムで、クラックの体積変化量は $8.8 \times 10^3 \text{ m}^3$ と推定した。帯水層内での水蒸気爆発によるクラックの急激な膨張と収縮と解釈した。Mayon の水蒸気噴火に伴う VLP のクラックの震源時間関数も膨張と収縮であることから、水蒸気爆発 (噴火および山体直下帯水層内) の共通点である可能性があるため、今後事例を増やして確かめることが望まれる。また、この膨張—収縮のパターンはブルカノ式噴火に伴う VLP の震源時間関数が膨張—収縮—膨張 (Dawson *et al.* 2011) であることとは違うため、噴火タイプ毎の系統的な比較が必要であろう。

雌阿寒岳の 2006 年 3 月噴火に前駆して 2 つの群発地震活動があり、噴火の 1ヶ月前に発生した最初の方の群発地震活動において発生した火山性微動に傾斜変動が見られた (Aoyama and Oshima, 2008)。そして、2008 年噴火では噴火の約 1ヶ半月前の 9 月末から群発地震活動が認められ、2006 年の微動と同様の傾斜変動が観測された (Aoyama and Oshima, 2015)。雌阿寒岳の 2006 年と 2008 年の火山性微動と傾斜変動の解析結果については後述する。ともに明瞭に捉えられた前駆現象として水蒸気噴火発生場の理解を進めるうえで重要な観測結果である。

4. 2000 年以降の国内の観測事例とその成果

ここでは、2000 年以降からの国内で発生した噴火についての研究を主体に前駆現象や構造などの周辺の研究を含めて記載する。

・雌阿寒岳

北海道東部に位置する雌阿寒岳では、2006 年 3 月と 2008 年 11 月に小規模な水蒸気噴火が発生した。噴火口はいずれの噴火もボンマチネシリ火口域であるが、2006 年の噴火ではボンマチネシリ赤沼火口西端および北西側にピットが開いたのに対し、2008 年の噴火ではボンマ

チネシリの南東側に位置する 96-1 火口が使われた。噴出量は、2006 年噴火は約 9,000 トン、2008 年噴火は約 12,000 トンと見積もられている（廣瀬・他、2007；石丸・他、2009）。いずれの噴火でも、先行現象として 1-2 ヶ月程度の地震活動の活発化が認められるとともに、傾斜変動を含む火山性微動の発生が観測された。Aoyama and Oshima (2008) は 2006 年 2 月 19 日の微動の広帯域地震計記録に山頂方向下がりの傾斜変動による成分が含まれることを示し、1 点のみの観測であったため球状力源の減圧と解釈した。2008 年噴火では噴火の約 1 ヶ月前の 9 月末から群発地震活動が認められ、9 月 29 日には継続時間が約 4 分間の火山性微動が発生した。噴火 2 日前の 11 月 16 日に発生した 2 回目の火山性微動では 2006 年の微動と同様の傾斜変動が認められた。Aoyama and Oshima (2015) は 3 点の広帯域地震計に含まれる傾斜成分について、ボンマチネシリ直下の北西-南東方向に走向を持つダイクの開口で傾斜変動パターンが説明できること、ダイク開口は石丸・他 (2009) にある阿寒湖畔の観測井水位上昇や山頂域の斜距離変化とも整合的であることを示した。そして、雌阿寒岳の火口と温泉分布を考慮して開口クラックの走向方向に構造的弱線があると解釈し、水蒸気噴火の前駆の変動ではこの構造的弱線が活動すると考えた。Ogiso and Yomogida (2012) は 2008 年噴火に先行した 2 つの火山性微動と 11 月 18 日の噴火微動について地震動の高周波振幅を利用した発生源推定法 (Battaglia and Aki, 2003; Kumagai *et al.*, 2010) を適用して、9 月の微動と噴火微動では発生位置が異なること、11 月 16 日の傾斜変動を伴う微動はその二つの発生源をつなぐような領域で発生したことを示した。また、Takahashi *et al.* (2012) は 2008 年 1 月に発生した群発地震に際して阿寒湖畔の観測井で水位低下が見られたことから、雌阿寒岳の深部 (>10 km) で収縮変動があったのではないかと推測している。

・有珠山

2000 年 3 月に 18 年ぶりの噴火を開始した有珠山では、過去の噴火事例と同様に激しい前兆地震活動と長期にわたる地盤変動が認められ、西麓 (N 火口群) と北西麓 (K 火口群) に開口した火口ではパルス状の空振を伴う爆発が頻発した (宇井・他、2002)。前兆地震は 3 月 27 日の夕刻以降に始まって 3 月 30 日に極大を迎え、地震が減りつつある 31 日の正午過ぎに噴火が開始した。Onizawa *et al.* (2007) は噴火翌年に実施した人工地震探査から 3 次元速度構造を推定して震源再決定を行い、山頂火口直下で始まった前兆地震活動は海面下 3 km 付近で等速度面に沿うように水平方向に拡大したことを示した。VT タイプの地震の他にも低周波地震の発生が見ら

れたほか (吉田・他、2002)、Yamamoto *et al.* (2002) は約 12 秒周期の VLP の活動を見出し、その振幅の時間変化が地盤変動の時間変化率と良く一致することを示した。マグマの上昇と貫入に伴うと考えられる局所的な地盤変動は 3 月 29 日には始まっており、噴火に向けて西方へ変動源が移動していった (岡崎・他、2002)。有珠山西麓での隆起変動は 8 月上旬にはほぼ停止し、中旬以降は沈降変動に転じた。マグマ上昇に由来する地殻ひずみ応答と考えられる井戸水位の変化も噴火前からとらえられている (Shibata and Akita, 2001; Matsumoto *et al.*, 2002)。パルス状の空振の発生は、N 火口群と K 火口群の活動度を昼夜問わず把握する上で非常に役立った (山里・他、2002)。八幡 (2002) は噴出物の解析から水蒸気爆発による破碎深度を推定しており、4 月上旬までは深度 1,000 m よりも深い場所で、その後徐々に浅くなり 5 月以降は深度 400 m よりも浅い場所で爆発が起こっていたことを示した。隆起に伴う地表変形の詳細な踏査から、三浦・新井田 (2002) は地表から 100 m 程度下のごく浅い部分までマグマが上昇していたと推定し、マグマの貫入過程を論じた。しかしながら、隆起域で北海道大学が行った深度 500 m 掘削調査では 2000 年噴火に寄与したと考えられるマグマに到達せず、隆起変動を生じたマグマの位置や状態については今も掴めていない。有珠山の 2000 年の噴火活動に関連する研究の多くは火山第 47 巻第 2-4 号にまとめられている。

・三宅島

2000 年 6 月に始まった噴火活動では、山頂噴火が発生するとともに約 2,500 年前にできた八丁平カルデラとはほぼ同じ位置に、カルデラ形成された (津久井・他、2001)。個々の噴火というよりも、カルデラ形成過程について議論されてきた。Geshi *et al.* (2002) は写真判読からカルデラ形状の変化を追跡し、地球物理学的観測結果と対比して考察することでカルデラ形成過程を明らかにした。2000 年 7 月 8 日に突然火口周辺が崩壊して、その後カルデラ底が 1 ヶ月に渡って継続して沈降を続けた。カルデラの成長は $10^7 \text{ m}^3/\text{day}$ で進行し、最終的には直径 1.6 km、深さ 450 m の体積 $6 \times 10^8 \text{ m}^3$ に達した。2000 年 7 月 8 日に始まった 40 日間のカルデラ形成時期には、VLP 地震パルスが多数観測された。Kumagai *et al.* (2001) は VLP 地震パルスの波形インバージョン解析結果から、マグマだまりにピストン状の固結マグマが落ちることで VLP 地震の発生を説明した。菊池・他 (2001) も VLP 地震パルスについて波形インバージョン解析を行い、ソースは等方 (膨張) 成分を含むモーメントテンソルにて表され、パルス群の膨張量の積算は陥没総量の約半分にあたることを示した。Fujita *et al.* (2002) は VLP 地震パルスに対

応した傾斜ステップが観測されていることを明らかにし、傾斜と地震の記録からパルスシル状マグマ溜まりの開口にて説明した。火道からドレインバックしたマグマがシル状マグマ溜まりに入ると解釈した。そして、Fujita *et al.* (2004) は VLP 地震パルスに伴う傾斜ステップの発生モデルとして、火道とつながるシル状マグマ溜まりにおける二相流モデルを提案し、周期的な傾斜ステップの発生を説明した。Kobayashi *et al.* (2009) はカルデラ形成開始前の 2000 年 7 月 8 日噴火以前の VLP 地震の波形インバージョン解析を行った。そして、深さが異なるモーメントテンソルとシングルフォースの組み合わせが最適解であることを示し、カルデラ形成前の火道からマグマのドレインバックを反映した地震であると解釈した。Kobayashi *et al.* (2005) は、三宅島 2000 年 7 月 13 日の噴火の 1 日前から 8 月 18 日の噴火に掛けて発生した 1-2 秒の時間幅の長周期 (LP) 地震パルスを見いだした。LP 地震パルスは火口直下 1.4 km にて等方 (膨張) の震源メカニズムで発生し、その際に音波が火道を伝わり、同じパルス幅の空振を発生させたことを明らかにした。

・浅間山

浅間山では 2004 年 9 月に 1973 年以來の本格的なマグマ噴火が発生し、その後も 2008 年から 2009 年にかけてなど、ときおり小規模な噴火を繰り返している。中長期的な前兆としては、2000 年頃より火口の熱活動の活発化や 2003 年の小噴火が認められていた (中田・他, 2005)。2004 年の 9 月 1 日、9 月 23 日、11 月 14 日に顕著な爆発的噴火があり、降灰調査から総噴出量は 16 万トン程度と見積もられた (吉本・他, 2005)。およそ 30 年ぶりとなるマグマ噴火が発生したことで、浅間山のマグマ供給系や火口浅部活動について地球物理学的観測から多くの新しい知見が得られている。青木・他 (2005) は活動期前後の GNSS データから、山体西側の深さ 3 km 付近にはほぼ東西に延びる貫入ダイクを推定し、体積変化量を $5 \times 10^6 \sim 1 \times 10^7 \text{ m}^3$ と推定した。村上 (2005b) は 2004 年以前の期間においても、山体西側にダイクの貫入が見られると指摘した。一方、Takeo *et al.* (2006) は、Double-Difference 法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) を用いた火山性地震の震源分布解析から、山頂火口直下から海水面下 1 km 程度まで延びるほぼ鉛直の分布と、そこから 3 km ほど西側へ延びるほぼ水平の分布を明らかにした。この西側へ延びるほぼ水平の震源は青木・他 (2005) で求められている貫入ダイクのほぼ上端に位置することから、Takeo *et al.* (2006) は火山性地震の震源分布がマグマの上昇経路を反映していると述べている。浅間山では 2003 年から火口近傍に広帯域地震計の整備が進められ

た。山本・他 (2005) はマグニチュードが 1 に満たないにもかかわらず卓越周期が数秒から 10 秒程度と長い特異な長周期地震が多数発生していることを見出し、振動軌跡から火口直下のごく浅い領域に震源を推定した。その後の観測で長周期地震は噴火活動終了後も継続的に発生していることが明らかになり、Maeda and Takeo (2011) と Maeda *et al.* (2011) は 2008 年に観測された長周期地震について、その広帯域地震波形が地震計の並進運動と傾斜運動の和で表されるとし、波形インバージョン解析から北側火口縁下 300 m 程度に位置するダイクの閉開運動で説明できることを示した。Kazahaya *et al.* (2011) は高時間分解能の SO_2 観測を実施し、長周期地震の直後に SO_2 放出率が増大すること、長周期地震の地震モーメントと SO_2 放出量に強い正の相関があることを示した。このことは浅間山の長周期地震が火山ガスの放出に関連して発生していることを意味しており、長周期地震と表面活動や他の観測量との関係が明瞭になった貴重な研究例と言えよう。この他にも、ブルカノ式噴火の発生機構の研究 (Ohminato *et al.*, 2006)、地震波速度構造や比抵抗構造の探査 (Aizawa *et al.*, 2008; Aoki *et al.*, 2009)、ダイク貫入に伴う異方性の時間変化 (Savage *et al.*, 2010)、ミュー粒子を用いた火口近傍ごく浅部の密度構造推定 (Tanaka *et al.*, 2010) など、多方面からの地球物理学的研究が行われている。浅間山の 2004 年の噴火活動に関連する研究の多くは火山第 50 巻第 5 号から第 51 巻第 1 号にまとめられている。

・御嶽山

御嶽山では、1979 年 10 月、1991 年 5 月、2007 年 3 月に水蒸気噴火があった。これらの噴火の前に山頂直下の群発地震活動があり、例えば 1991 年噴火では噴火 20 日前、2007 年噴火では噴火の 3 ヶ月前から群発地震活動があった (気象庁, 2013)。その後、GNSS にて明瞭な変化が見られたのは 2007 年が初めてで、群発地震開始から 1 ヶ月後に山体膨張を認識できた (気象庁, 2013)。その後、山体膨張は停止したが、収縮に転じることはなかった (気象庁, 2013)。Nakamichi *et al.* (2009) は 3-2 節にて述べた通り、1 月 25 日の超長周期 (VLP) イベントのメカニズムと震源を推定し、2006 年末から 1 月までの山頂直下の地震と山体膨張から推定されるマグマ貫入により帯水層が温められたために起こった山体内の水蒸気爆発と解釈した。その後、2014 年 9 月 27 日に噴火があったが、噴火の 16 日前から山頂直下に顕著な地震活動が見られた。ただし、噴火時点までに GNSS には顕著な収縮の変化は見られていない。Kato *et al.* (2015) は 3-2 節に詳しく述べた通り、この地震活動が始まった 2014 年 8 月末から噴火直後の 9 月末までを対象に連続地震波形成

録に Matched Filter 法を適用することで多数の小地震を検出し、噴火直前の震源域拡大を見いだした。

・阿蘇山

阿蘇山は、火山活動が比較的静穏な時期には火口内に湯だまりを持ち、活動度の変化に合わせて湯だまりの大きさも変化することが知られている。Terada *et al.* (2008) は 2007 年 8 月の地震増加や火口壁の赤熱現象といった活動度増大時期を含む約 1 年半にわたる湯だまりの連続観測から、熱活動と湯だまりの時間変化を議論してきた。Terada *et al.* (2008) では可視カメラによる湯だまり表面の標高観測と詳細な地表面デジタルマップを組み合わせて湯だまりの体積を精度良く評価するとともに、熱映像から推定される湯面温度と実測値との差を考慮して放熱率の推定を行った。2006 年から 2007 年の放熱率は平均して 220 MW であり、2007 年 8 月の活動増大時には湖面温度の上昇に伴い一時的に 280 MW まで上昇したと報告している。その後、阿蘇山では 2014 年 11 月からおよそ 20 年ぶりとなる本格的な噴火活動が始まった(横尾・宮縁, 2015)。2015 年 4 月時点で噴火が継続しているのは第一火口底の中央部で、第一火口南壁における熱活動や第二火口から第四火口には異常は認められていない。今回の活動も、安定した湯だまり形成期から湯だまりの縮小・消失期を経てストロンボリ式噴火に至っており、過去の阿蘇山の活動サイクルと同様の経過を辿っているようである。2015 年 2 月 2 日までの約 70 日間での噴出量は約 150 万トンと見積もられ、火口内に溜まっている量とあわせても 200 万トン程度と考えられている(横尾・宮縁, 2015)。阿蘇山の前回の本格的噴火は 1995 年頃までとされているが、多項目観測の観点から見た 1995 年以前と現在との大きな違いは、GNSS 観測網が展開されるようになったことと VLP 地震が発見されたことであろう。特に VLP 地震の研究からは、浅部の火道システムを構成するクラックの具体的な位置や形状が推定されている(Kaneshima *et al.*, 1996; Yamamoto *et al.*, 1999)。湯だまりの生成から消滅、マグマ噴火へといたる熱活動の変化は、地下深部からの物質供給と深く関わっていると考えられ、VLP の規模や周期などの時間的な変化として反映される可能性が高い。昨年からの本格的な噴火活動を受け、多項目観測による浅部の火道システムに関する研究の一層の発展が期待される。

・新燃岳

新燃岳では、2008 年 8 月と 2010 年 3 月～7 月に水蒸気噴火があった。その後、2011 年 1 月 19 日にごく小規模の水蒸気噴火ののち、1 月 26 日に準プリニー式噴火が起こり、1 月 27 日まで継続した。その後、火口内に溶岩が噴出し、2 月 1 日まで溶岩ドームが成長し直径 600 m

に達した。その後、ブルカノ式噴火を 3 月 1 日まで繰り返した。観測研究の成果は Earth Planets Space の特集号 “Shinmoe-dake Eruption in 2011 — An Example of Less-Frequent Magmatic Activity —” でまとめられているが、その中で噴火過程を扱っているものを紹介する。2011 年噴火活動の概要については、特集号の Nakada *et al.* (2013) と Kato and Yamasato (2013) を参照していただきたい。Okubo *et al.* (2013) は新燃岳から北西 6 km にある霧島火山観測所に絶対重力計を設置して、ブルカノ式噴火の前後の重力変化を捉えた。ブルカノ式噴火の 7 時間前から 2 時間前において重力値が $1\sim2\ \mu\text{gal}/\text{hour}$ にて低下し、噴火の 2 時間前から直前に重力値が回復した。重力変化を観測所直下の深さ 9 km の球状圧力源の増圧と減圧そして火口直下の開口割れ目の閉開で説明した。溶岩ドーム形成の最終段階にてハーモニック微動とハーモニック空振が観測された(Ichihara *et al.*, 2013)。Ichihara *et al.* (2013) はハーモニック微動のみの観測と微動と空振同時観測のケースを明らかにし、室内実験結果の考察から微動のみと同時観測の出現は火口内の溶岩が徐々に固化していく過程でのマグマ粘性の上昇変化と関係があることを指摘した。Matsumoto *et al.* (2013) は 1 月 29 日までに 25 台の短周期地震計を新燃岳から西 3 km の地点に構築しアレイ地震観測を実施した。そして、ハーモニック微動のアレイ解析を行い、微動波動の到来方向の変化から、マグマ溜まりからマグマが火口方向に移動する際に微動が発生すると解釈した。Nakamichi *et al.* (2013) は新燃岳から東北東 5 km の地点にてアレイ地震観測を行い、2011 年 2 月から同年 9 月までの噴火活動において 5-20 Hz 帯が卓越する微動を見だし、新燃岳の北側の深さ -1 km から 0.5 km にて発生しており、新燃岳北側にある熱水系にて発生していると解釈した。

・桜島

桜島は 1955 年から南岳においてブルカノ式噴火を繰り返している。1972 年から増加し、1970 年代後半と 1980 年代前半が最盛期で噴火回数は年間 200 回を超える年が 7 年あった。その後は、南岳のブルカノ式噴火の活動は徐々に低下しつつも、1991 年に年間 200 回を超えるなど、依然として活発であったが、2000 年代に入ると頻度は低下し、2003 年から 2007 年は年間 20 回に満たなくなった。しかし、2006 年に昭和火口にて 58 年ぶりに噴火があり、2008 年からブルカノ式噴火が発生するようになった。ブルカノ式噴火の年間頻度は増え、2009 年は 500 回、2010 年と 2011 年は年間 1,000 回、2012 年は 900 回、2013 年は 800 回を超えた。2014 年は 450 回と低下したが、2015 年は 9 月時点で 700 回を超えた。このように桜島ではブルカノ式噴火が高頻度で発生してきている

ので、ブルカノ式噴火過程に関する研究が多くなされた。詳しくは、井口 (2005) がレビューしているので参照されたい。ここでは、井口 (2005) 以降の研究について述べる。桜島の観測の特徴は坑道における地殻変動連続観測である。観測坑道は北海道、東北、九州の火山や地震予知研究のために日本各地にあるが、ブルカノ式噴火を多数かつ長期間に観測しているのは世界に例がない。昭和火口噴火について多数の噴火について解析した事例として、3-1-2 節で述べた Iguchi *et al.* (2013) を参照していただきたい。また、桜島のブルカノ式噴火については可視・熱映像と空振の観測と解析が精力的になされた。Yokoo and Ishihara (2007) は、1980 年代の噴火の可視映像解析から圧力波の伝播速度を 342–574 km/s と推定した。Morrissey *et al.* (2008) は、1998 年 5 月に行われた空振臨時観測のデータを用いてブルカノ式噴火に伴う地震と空振を解析した。Yokoo (2009) は、2008 年に熱赤外映像の連続観測を実施し、1 秒サンプリングで熱データを取得した。そして、噴火の最初の 2–5 秒間で噴煙の温度が上昇して、その後数分間に徐々に温度が低下することを明らかにした。また、噴煙温度と噴煙放出速度に正相関を見いだした。石峯・他 (2009) は、昭和火口のブルカノ式噴火の噴煙映像に Particle Image Velocimetry 法を適用し、噴煙の噴出速度を求め、噴火開始 5 秒間の火口直上における最高速度の平均値 83 m/s を得た。Yokoo *et al.* (2013) は、ひずみ・傾斜、地震、空振、可視・熱映像、SO₂ 放出率の観測データを併せて昭和火口のブルカノ式噴火の前駆過程を明らかにした。前駆過程は以下の通りである。まず、火口底下 1 km にマグマが貫入することにより山体が膨張し、噴火開始の数 10 分前に火口底がプラグ形成によって閉塞すると、火口直下にガスだまりが形成される。そして、噴火数分前からプラグに亀裂が形成され、ガスが放出し始め、ガスだまりが減圧し、急激なマグマ発泡・破碎が起こり、火道内で爆発する。破碎したマグマは火道内を上昇して、火口底を突き破って噴火が起こる。

桜島は国際的に開かれた観測フィールドの一つであり、例えば IAVCEI2013 総会の前後の期間において国際共同の臨時稠密空振観測が実施された (Fee *et al.*, 2014)。この観測データは公開されており、ブルカノ式噴火のプロセスならびに空振の伝播過程について研究が活発に行われている (例えば、McKee *et al.*, 2014; Yokoo *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2015)。研究者のおのおのが得意とする観測・調査研究の世界的な実践場であるが、IAVCEI2013 以降さらに観測・調査の頻度が高まっている。

・諏訪之瀬島

諏訪之瀬島は、1989 年から 1994 年まで御岳山頂火口

において頻繁に爆発的噴火をしていた。1995 年から 2000 年 11 月までは噴火活動は比較的静穏であったが、2000 年 12 月に新たな火口を形成して噴火活動が始まった。2001 年が最も噴火活動が活発であったが、その後低下し、2011 年 4 月から 2013 年 7 月まで噴火は 15 回発生した。しかし、2013 年 8 月以降は再び噴火活動が活発なり、2013 年 12 月は 213 回噴火した。Yokoo and Iguchi (2010) は、映像・空振・地震の解析から爆発的噴火の初期過程を明らかにした。そして空振に見られる爆発相の先行相は、爆発の 0.7 秒前の火口底の盛り上がりに対応することを明らかにした。Nishimura *et al.* (2013) は、火口から 400 m の地点における地震と傾斜の観測から、爆発的噴火に前駆する山体膨張を検出し、それと同時に起こる連続微動の停止について継続時間を調べた。そして、山体膨張と微動停止が約 1–2 分継続し、傾斜振幅が数十 nrad であることを明らかにした。また、微動振幅停止時間が長ければ長いほど、爆発地震の振幅と山体膨張の傾斜量が大きいことを示した。火山性微動が停止したのは火口が閉塞したため連続的ガス放出が停止し、それにより火道浅部が膨張したためと解釈した。

5. 多項目観測の意義と今後の課題

5-1 噴火様式と多項目観測

本稿では、最近の国内外の火山における噴火事例と関係する研究成果を紹介するとともに、代表的な噴火様式 (タイプ) 別に噴火過程の物理モデルと観測に基づく研究事例を紹介してきた。地震、地殻変動、重力、地磁気、熱、火山ガス、空振などに加え、映像やレーダー、様々な地球観測衛星、さらには宇宙線を用いて多様な噴火過程の本質にせまるための努力が続けられている。我々はこれらの多様な手法を駆使して火山噴火を観測しているのであるが、既に 2 章で述べたようにそれぞれの観測項目には、原理的および技術的な制約から、観測の周波数帯域や空間的なスケールが存在する。一方で噴火に伴う現象の時空間スケールも極めて多様である。そのため、それぞれの火山の噴火様式や活動特性、研究対象となる火山現象に応じて観測項目が選択され成果を上げてきている。

ブルカノ式噴火が卓越する火山では、地震、地殻変動、空振といった観測が長年にわたって重点的に行われている。これは、ブルカノ式噴火に伴って爆発地震や音波 (衝撃波) が発生し、また数時間単位の山体の膨張変動が噴火に前駆して現れるといった理学的および経験的な知見に基づく。1 回のブルカノ式噴火は数十秒から長くても数百秒程度の時間的に短いスケールの現象であるため、噴火に伴って発生する短時間の変位や圧力変動といった

物理的な信号は、周辺の媒質中（地面や大気）を主に波動として伝搬する。それゆえ、ブルカノ式噴火の噴火過程に関する情報を抽出するには、地震観測や空振観測が有効なのである。近年の多項目観測から、ブルカノ式噴火については噴火の前駆過程ならびに爆発過程の詳細が明らかになりつつある。前駆過程としては、地殻変動観測から山体膨張と停滞および若干の収縮が複数の火山にて見られ、火山性微動の発生と停止との関係も明らかになりつつある。爆発地震の波形インバージョンでは、共通的なメカニズム解として鉛直方向のダイポールと鉛直下向きのシングルフォースが得られている。また、爆発地震のシングルフォース解析から力と継続時間のスケールリングが複数について行われ、スケールリング則の検討が進んでいる。その一方で、ブルカノ式噴火の初期過程については、同じく地震波の解析から火口底より1 km 以上深い部分での増圧と大きな減圧が爆発地震の初期相を構成しているとする研究もある。地殻変動観測や空振観測から明らかになっている前駆過程と爆発地震はどのような関係にあるのか、そもそも爆発地震はどの深さでどのように始まるのかといった問題は、ブルカノ式噴火の噴火過程を理解する上で最も重要な課題であろう。このように、個々の火山や噴火における現象の観測からの前駆過程と噴火過程の解明は進んできている。しかし、観測から統一的なモデルを提案していくためには、多項目観測の複数火山における比較や、1 火山において統計的处理が可能なのほどの多数の噴火の解析が必要であろう。

ストロンボリ式噴火も一つ一つの噴火の時間スケールが十数秒程度と短いため、地震や空振の観測が精力的に進められてきた。物理観測のデータと表面現象の観測から、マグマ中を上昇してきた大気泡の破裂と火山ガスの放出が主となる噴火現象であることが明らかになり、多くの研究者に受け入れられる理論的な噴火モデルも提唱されている。Stromboli 火山では可視映像観測に代わり、高速度カメラやレーダーなどを用いた高時間分解能の観測で噴火をとらえる試みが行われ、時空間的に一層微細な表面現象が明らかになると期待される。また、近年の火口近傍における地殻変動観測により、個々のストロンボリ式噴火にともなう微小な山体の膨張-収縮現象が見出された。火道内の気泡の上昇から期待される理論的な地殻変動と観測された地殻変動データを比較する研究も行われ、既存モデルの改良へとつながる新しい知見も得られてきている。その一方で、Stromboli 火山ではストロンボリ式噴火に伴うと考えられてきた VLP の震源位置が時間とともに変化することが明らかになってきた。VLP の活動がストロンボリ式噴火とどのように関係しているのかは、火山学的にも地震学的にも非常に興味深

い。VLP 発生位置の時間変化に関する報告事例が多くないので、丁寧な観測と解析を続けることが謎の解明につながるであろう。国内でも昨年より始まった阿蘇山の活動でストロンボリ式噴火が見られている。マグマ活動と長周期微動との関係などについて、新たな知見が得られると期待される。

一方で、プリニー式噴火は数時間単位で継続する大規模な噴火であり、噴火の物理モデルが一次元定常流で近似されてきたことから分かるように、ある噴火状態を数時間単位で継続するというのが特徴である。数時間という周波数帯域は、地震観測や空振観測が得意とする時間スケールよりも長いために、地震学的研究だけではプリニー式噴火のごく一部の過程しか理解できない。プリニー式噴火は本稿にて扱う噴火現象の中では最も低頻度であり、観測網が充実している欧米や日本では St. Helens 以降 30 年間以上に渡って発生していない。プリニー式噴火は規模が大きく頻度が少ないため、火山に張り付いた近接観測よりも、汎地球規模の観測網データや衛星データによる現象解明の貢献が高い。しかし、St. Helens 噴火についての金森博雄らの地震学的研究のあとは、観測から噴火時の内部プロセスそのものを解明するための地震や地殻変動の研究はほとんど見られない。プリニー式噴火の低頻度性は致し方ないが、地質調査や何らかの方法でプリニー式噴火のポテンシャルの高い火山を見いだし、10 年以上の単位での運用する定常的観測網を構築していくしか、プリニー式噴火の観測研究を前進させる方法はない。また、引き続き汎地球規模の観測網や衛星データの活用も必要である。

ハワイ式噴火の溶岩噴泉についても同様に、現象の継続時間の長さゆえに、地震や空振の観測から噴火の物理過程に関する情報を得ることは難しい。地震学的な研究や測地学的な研究は、噴火過程そのものを対象とするよりも、噴火にいたるまでのマグマの移動経路の解明や、噴火場所の早期検知などに目標が置かれているようである。噴火過程の理解にとって不可欠な噴火モデルの評価に関しては、火山ガスや噴出物の解析から重要な成果もたらされているというのが現状である。既存の2つの噴火モデルが予測する火道内の流れについて、観測からどのようにして情報を得ることができるのか、実験的な研究などを含めて検討していくことが重要である。また、Etna 火山の観測事例や既存の物理モデルが示すように、ハワイ式の噴火活動はストロンボリ式噴火の延長上にあると考えられる。これら2つの噴火様式の遷移がどのように進行するのかを丁寧に観測することも、噴火モデルの検証に大きく役立つと考えられる。

溶岩ドーム噴火はさらに時間スケールが長く、地殻変

動観測や写真測量などから溶岩噴出率に時間変化が見いだされてきた。溶岩ドームを有するいくつかの火山に共通した特徴として、噴出率の変化に伴って特有の地震活動が認められることが報告され、最近では地震学的な見地からドーム成長の力学モデルが提案されている。地殻変動観測や高い時空間分解能でのドーム変形や体積変化の推定値などに対比することで、ドーム成長の力学モデルの検証が進められていくであろう。

このようにマグマ噴火では、いずれの噴火様式においても、観測、理論もしくは実験に基づく噴火の物理モデルが提唱されており、火山学の様々な分野の研究者が、それらの評価や再検討、そして新たなモデルの提案といった活動を進めている。その中でも、物理的および化学的な多項目観測は特に噴火モデルの評価や検証において非常に重要な役割を果たす。理論的な考察や一部の観測項目の解析結果に基づいて提案された噴火モデルが、その他の観測項目についても整合的であるかどうかを多くの噴火事例に関して検証することでモデルの改良が進み、噴火のダイナミクスをより深く理解することにつながってゆく。

その一方で、水蒸気噴火の観測研究がおかれている状況は、以上に述べたマグマ噴火とは大きく異なる。FCIモデルや平衡破綻型爆発モデルなどいくつかのモデルが提示されているが、それらはマグマ噴火のモデルに比べて概念的であり、実際の水蒸気噴火事例に適用して観測データと対比できる状況には至っていない。これはマグマなどの熱源と地下水などとの相互作用が、地下においては極めて複雑であることに起因する。また Barberi *et al.* (1992) がまとめているように、これまでの観測研究事例では前兆現象の現れ方や前兆の有無についても火山毎に異なっていて、現状では極めて見通しが悪い。この第一の原因は、水蒸気噴火の観測研究事例が少ないことにある。一般的に火山が長期間の静穏期間を経て噴火する場合は、ほぼ必ずといって良いほど水蒸気噴火もしくはマグマ水蒸気噴火から始まる。現在頻繁に発生している桜島昭和火口の噴火も例外ではなく、2006年の噴火再開時は水蒸気噴火であった。水蒸気噴火は日本のどの火山も静穏期から噴火活発期に移るに当たって必ずと言って良いほど起こる。さらにいえば、御嶽山2014年噴火のように水蒸気噴火だけで終息するケースが多い。水蒸気噴火はあちこちの火山で発生しているにもかかわらず、同一の火山で頻繁に繰り返すことが少ないため、十分な観測が行われてきていなかったのである。これは観測や調査をする側のスタンスの問題で、噴火が活発でない火山であっても常時監視対象火山であれば、最低1箇所には地震計・空振計、そして可視カメラがある。限られた観

測データであっても前兆現象とおぼしき変化が認められれば、他火山における研究成果を参照しながら迅速に観測点の展開を進め、万が一の噴火開始に備えるべきである。そのような努力の結果としてデータの蓄積が進み、水蒸気噴火過程を解明する手がかりが得られる。マグマ噴火の章で述べたように、近年の観測研究の傾向は多点データ解析によるメカニズム研究が主であった。同一の火山で頻繁に繰り返すとは限らない水蒸気噴火については、同じアプローチでの観測研究は容易ではない。それゆえ、水蒸気噴火の発生の可能性が高い火山を選定してキャンペーン多項目多点観測を行うとともに、少数の観測点しかない場合でも必要な情報を抽出するための解析手法を磨く必要がある。水蒸気噴火はマグマ噴火と比べて一般的に小規模であると受け止められているがそうではない。例えば、水蒸気噴火の御嶽山2014年噴火の噴出量は数十万から120万トンと推定される一方（及川・他、2015; Maeno *et al.*, 2016）、マグマ噴火である桜島の2012年7月24日南岳噴火は28万トンと推定されている（井口、2013a）。水蒸気噴火は水蒸気爆発ともいわれるように爆発性が高く、警戒されている状況でのマグマ噴火よりも無警戒で発生する水蒸気噴火の方が被害の拡大傾向がある。よって、防災面においても水蒸気噴火の研究は重要である。このためには、水蒸気噴火（爆発）の機会を逃さず迅速に観測やデータ解析と現地調査を実施することが、水蒸気噴火過程解明の鍵となる。

5-2 多項目観測による噴出量と噴出率の推定

どのような様式の火山噴火であっても、一旦噴火が始まると地表や大気中に溶岩、火砕物、音波などが放出され、周辺で社会生活を営む我々にとっての脅威となりうる。その噴火がどのような噴火様式や噴火規模、噴火強度であるのかを迅速に知ることは、防災・減災や活動予測の観点からも極めて重要である。噴火規模については、主に地質学的な降灰量の調査や測量等による溶岩流出量の推定などから見積もられる、噴出物の総量が基本的な指標となっている。現在広く用いられている火山爆発指数 (Volcanic Explosive Index: VEI) は噴出量の観点から噴火規模を表す指標の1つであり、 10^4 m^3 以下を0、 10^{12} m^3 以上の噴火を8として噴火規模を9段階で表す (Newhall and Self, 1982)。このように噴出物量にもとづいて噴火規模を表現することは、火山噴火が地表への物質の放出現象であることからして極めて自然である。また、単位時間に放出される噴出物量（噴出率）を噴火強度と考えれば、噴火強度は総噴出物量を噴火継続時間で割ったものとして定義できる。

Fig. 10に噴火タイプ別に推定されている1回の噴火の噴出物量と噴出率をまとめ、参考のために小屋口

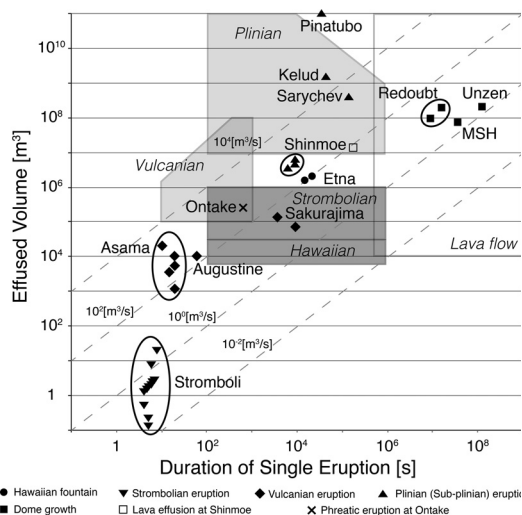


Fig. 10. Duration-volume relationship of single eruption for each eruption style. Rectangular areas with eruption styles indicate the relationship shown in Koyaguchi (1995). Diagonal broken lines show equivalent eruption rate. We compiled the data from the following reports; Hawaiian fountain (Bonaccorso *et al.*, 2014 and Calvari *et al.*, 2011 for Etna), Strombolian eruption (Ripepe *et al.*, 1993 for Stromboli), Vulcanian eruption (Ohminato *et al.*, 2006 for Asama, Iguchi 2013b and Iguchi and Tameguri 2014 for Sakurajima, Dawson *et al.*, 2011 for Augustine), Plinian eruption (Smithsonian Institution, Global Volcanism Program for Pinatubo, Nakada *et al.*, 2014 for Kelud, Rybin *et al.*, 2011 for Sarychev, Kozono *et al.*, 2013 for Shinmoe sub-Plinian), dome growth (Iverson *et al.*, 2006 for St. Helens, Bull and Buurmann 2013 for Redoubt, Nakada *et al.*, 1999 for Unzen 1991–1995), lava effusion (Kozono *et al.*, 2013 for Shinmoe 2011), phreatic eruption (Maeno *et al.*, 2016 and Oikawa *et al.*, 2015 for Ontake 2014).

(1995) に示されている噴火タイプ別の噴出量と噴火継続時間の関係図を重ねた。横軸に噴火継続時間、縦軸に噴出量をとっているの、Fig. 10 の左上ほど噴出率が高い爆発的な噴火で、右下ほど穏やかな噴火と見ることができる。1 回の噴火という観点で見ると Stromboli 火山におけるストロンボリ式噴火がもっとも時間スケールが短く、噴出量は数 m^3 程度、噴出率にして $0.1\text{--}1\text{ m}^3/\text{s}$ 程度と推定されている。図の右上には噴火継続時間が長く噴出量も大きい溶岩ドーム噴火がプロットされる。溶岩ドーム噴火では長い活動期間中に噴出率が変動することが知られているが、ここではドームの生成開始から終了までを 1 回の噴火とした。近年の Redoubt 山、St. Helens 山、

そして雲仙岳の活動は、平均して $1\text{--}10\text{ m}^3/\text{s}$ 程度の噴出率を示す。これらに対し、ブルカノ式噴火である浅間山、Augustine 山、準プリニー式噴火といわれる新燃岳 2011 年噴火の噴出率は $100\text{--}1,000\text{ m}^3/\text{s}$ であり、ストロンボリ式噴火や溶岩ドーム噴火よりも 2 桁ほど大きい。この噴出率の高さは、ブルカノ式噴火やプリニー式噴火が爆発的と表現されることと良く対応しているように思われる。桜島の噴出率がこれらに比べて若干低いのは、地殻変動データに基づいて噴火継続時間が推定され、他火山の研究事例よりも時間が長く見積もられているためと考えられる。また Etna 山の溶岩噴泉活動についても数時間の間に 10^6 m^3 を超える噴出物量があったと推定されており、噴出率で見ると $100\text{ m}^3/\text{s}$ 程度と大きい値をとる。注目すべきは御嶽山の 2014 年水蒸気噴火の事例である。噴火の継続時間がおおよそ 10 分とされているのに対して噴出物量は 25 万 m^3 と大きい。噴出率に換算すると $100\text{ m}^3/\text{s}$ を超える値となり、ブルカノ式噴火と同等程度に噴火強度が大きかった（爆発的な噴火）ことが示される。個々の噴火事例をコンパイルして Fig. 10 のようにプロットしてみると、小屋口 (1995) の示す分布とは若干異なっているものの、やはり噴火様式に応じた噴出物量や時間スケールが見出されることが分かる。

以上に示した噴火事例ごとの噴出物量は、降灰分布調査などの地質学的手法によるものや、地震や地殻変動などの多項目観測データに基づいて調べられたものなどが混在している。これら 2 つの手法の大きな違いは、時間分解能（即時性）にある。地質学的手法は直接的に噴出物を調べるので推定精度が高いという特徴があるが、一般的には噴火の 1 つのステージが終了したタイミングで調査が行われるため、すぐには情報が得られない。一方で、多項目観測データに基づく手法は、噴出物量を推定する上で何らかの仮定や経験則が必要となるため精度という面では劣るが、データが取得されるたびに値を更新でき、時間変化を細かく追跡できるという長所がある。また、人手や時間がかかる地質調査を経ないで済むため、噴出物量の推定事例を飛躍的に増やすことが可能になる。このような観点から、特に歴史の長い地震観測データと噴出物量の関係を調べるという研究はかねてより行われてきた。最近ではその他の観測項目のデータも用いて、噴火規模の指標となる噴出物量を観測データから推定する試みも進められている。

地震学的データに基づいて噴出量や噴出率を推定する手法の検討は、最近も進められている。McNutt and Nishimura (2008) は全テフラ体積と火山性微動の継続時間から推定した噴火継続時間から平均噴出率を推定している。この手法では、火山性微動からの噴火継続時間推

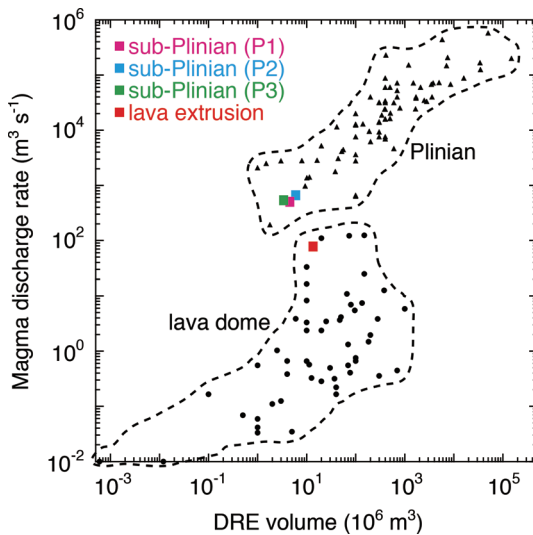


Fig. 11. Magma discharge rate versus dense rock equivalent (DRE) volume for the major sub-Plinian (pink, blue, and green squares) and lava extrusion (red square) phases of the 2011 Shinmoe-dake eruptions, as estimated from geodetic and satellite observations. These data are compared with compiled data for global examples of 78 Plinian (triangles) and 55 lava dome (circles) eruptions. Figure is taken from Kozono *et al.* (2013). Reprinted from Bulletin of Volcanology, Magma discharge variations during the 2011 eruptions of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations, **75**, 2013, 695, Kozono, T. *et al.*, ©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013, with permission of Springer.

定が平均噴出率推定の精度を大きく左右する。井口 (2013b) は桜島の月別火山灰放出量が爆発的噴火の噴火回数と火山性微動のパワー（二乗振幅積算値）の関数で表されると提案し、放出量の評価を試みた。Prejean and Brodsky (2011) は、地震波動から推定されるシングルフォースから噴出率を推定する手法 (Brodsky *et al.*, 1999) を適用して、アラスカの Kasatochi 火山の 2008 年プリニー式噴火と Augustine 火山の 2006 年ブルカノ式噴火の噴煙柱高度を推定した。

Kozono *et al.* (2013) は霧島新燃岳の 2011 年噴火について、傾斜計と衛星データから、マグマの圧縮率を考慮した上でマグマ噴出量 (DRE Volume) と噴出率の関係を明らかにした。ここで、溶岩ドーム形成時のマグマ噴出量 (DRE Volume) と地殻変動の変化量から推定される体積変化量との比率を使い、準プリニー式噴火について体

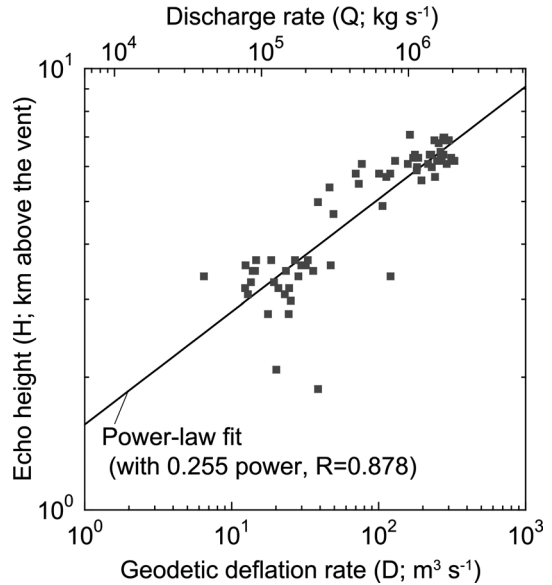


Fig. 12. Magma chamber deflation rate (or discharge rate) versus cloud height on January 26 and 27, 2011 during the 2011 Shinmoe-dake eruption activity. A fitting line with power-law scaling is also shown (0.255 power, $R=0.878$). The scale at the top of the figure represents the discharge rate Q (kg s^{-1}) calculated from the geodetic deflation rate D ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) using the relationship $Q = 2.5 D \bar{\rho}$, where $\bar{\rho}$ is the density of dense rock (set to be $2,500 \text{ kg m}^{-3}$). Figure is taken from Kozono *et al.* (2014).

積変化量からマグマ噴出量を推定している。そして、世界中の溶岩ドーム噴火とプリニー噴火のコンパイルデータと合わせて噴出量と噴出率を図示した (Fig. 11) ところ、新燃岳のケースはプリニー式の中では低噴出率、低噴出量にあたり、溶岩ドーム噴火と見なせば高噴出率、中噴出量にあたることを示した。さらに、Kozono *et al.* (2014) は傾斜計記録から推定される変動源の体積減少率の変化と気象レーダーのエコーで得られた噴煙柱高度の変化を比較し、両者は相関が高く、体積減少率から求めた噴出率と噴煙柱高度は理論的に示されたべき乗則に合うことを示した (Fig. 12)。このように、地殻変動から噴出量と噴出率をモニターすることで、噴火タイプと噴出物量を即時把握することも可能になりつつある。

これらの研究は、地質調査などの手法によらずとも、物理観測データからも噴出物量や噴出率を見積もれることを示している。さらに研究が進展すれば、噴火全体の噴出物量 ΔV を推定するだけでなく、時々刻々と変化する噴火についての情報、すなわち噴出量の時間変化 $\Delta V(t)$ を把握できるようになることも期待される。これ

は、噴火の発展過程を定量的にとらえることであり、噴火過程の理解を深める上では極めて重要である。その一方で、そもそもどのくらいの噴出量が噴出するポテンシャルがあるのか、すなわち噴火に寄与できるマグマの蓄積量 V 自体を評価するための研究も進めていかなければならない。地質調査や物理観測データから見積もられる噴出量は、マグマの移動量(変化量 ΔV)でしかない。具体的に言えば、現在広く行われている解析で観測データから把握できるのは噴火前と噴火後の「差」であって、絶対量を知ることができないのである。火山活動の長期的な評価を目指し、潜在的に大規模な噴火の可能性を秘めた火山を見出すためには、現状の多項目観測や解析手法を一層進展させるとともに、新しいアプローチの観測手法の開発にも取り組んでいかなければならない。

5-3 噴火様式の多様性と噴火エネルギー分配

火山噴火中における噴出量と噴出率は、噴火タイプ(爆発的噴火もしくは非爆発的噴火)と強度を支配する重要なパラメータで、例えば爆発的噴火では噴煙柱高度は噴出率と良い相関を持つ (Sparks *et al.*, 1997; Mastin *et al.*, 2009; Kozono *et al.*, 2014)。また、前節にて噴出量と噴火の継続地震(特徴的時間)や噴出率との関係から噴火様式を対応させられること説明した。噴火様式や噴出量(噴火規模)や噴出率(噴火強度)を決める要因は何だろうか? その鍵となるのは、噴火のエネルギーとパワー(単位時間当たりエネルギー)の大きさと、エネルギー分配である。特に、噴火の物理過程に迫るにはエネルギー分配の問題に着目する必要がある。例えば、地震エネルギーは、地震断層形成の破壊エネルギー、断層滑りの摩擦で消費される熱エネルギー、地震波エネルギーに分けられる (Kanamori and Brodsky, 2004; Kanamori and Rivera, 2006)。例えば、2011 年東北地方太平洋地震について、プレート運動により地球内部に蓄積された地震エネルギーと地震波エネルギーとして解放される割合が小さい場合であることが明らかになり、地震発生過程の研究に大きな進展をもたらした (Ide *et al.*, 2011)。しかし、噴火プロセスにおいてエネルギー分配の問題に着目した観測研究は多くはない。

小屋口 (2008) は噴火現象の多様性を 1 つの尺度で記述することが困難であるため、エネルギー変換という観点で整理をしている。そして、エネルギー変換の過程は、噴出物の温度、速度、地殻変動、気圧変化の量などの観測量を用いて推定することが出来ると指摘し、下記の 7 種のエネルギーを挙げている (小屋口, 2008)。これらは、(1) 火砕物と火山ガスに含まれる熱量から推定される熱エネルギー、(2) 火砕物や火山ガスの速度と質量から推

定される運動エネルギー、(3) 地下のマグマの密度差から生じる重力ポテンシャル(位置)エネルギー、(4) マグマが移動することによって生じる歪エネルギー、(5) 地震波エネルギー、(6) 空振エネルギー、(7) 火口形成に伴う破壊エネルギーである。

7 種類のエネルギーと観測項目についての対応付けをする。熱エネルギーは、例えば噴煙の熱赤外・可視映像からモデルを用いて推定できる (例えば、Woods and Kienle, 1994)。運動エネルギーは、地質調査などにて噴出量を推定し、そして映像から平均噴出速度を抑えれば推定できる。

位置エネルギーはマグマと周囲の岩石との密度差を反映しているが、それを直接測定することは容易ではない。例えば、重力測定では地殻変動の影響や地下水の影響を補正する必要がある (Kazama *et al.*, 2015)。また、宇宙線を用いた密度トモグラフィーでは、火山体よりも深部への適用に課題がある。また、人工地震探査や地震波トモグラフィーから速度構造を推定 (筒井, 2005; Lees, 2007) し、関係式と重力測定との同時推定から密度構造 (例えば、Onizawa *et al.*, 2002) にする必要がある。ただし、現状では解析手法と観測点密度の制約から空間分解能が地震波の波長よりも十分に長いという制約があるため、例えば火道をイメージングに成功した宇宙線を使った密度トモグラフィー (例えば、Tanaka *et al.*, 2007) 程度の分解能はない。

歪エネルギー、地震波エネルギー、空振エネルギーは直接的に推定が可能である。歪は主として測地観測から測定され、GPS が火山観測に使われ始めて 20 年経過し、その間に InSAR などの測地技術の発達に伴い火山における地殻変動観測は充実してきている。また、直前の前駆過程から噴火時と噴火後の地殻変動も最近 10 年で明らかにされてきた。ただし、火山の地殻変動をエネルギーの観点から整理した事例は筆者の知る限り無い。一方、地震や空振は、波形から容易にエネルギーに変換することが出来るため、エネルギー推定が昔から行われてきている。Johnson and Aster (2005) は、ストロンボリ式噴火において空振と地震の相対的エネルギー分配 (Volcanic Acoustic-Seismic Ratio: VASR) を推定した。例えば、火口と火道が比較的オープンないいわゆる開口型火山の場合は、地震波励起は小さく、空振励起が大きいいため、VASR は大きくなる。このように、空振と地震のエネルギー分配の関係を明らかにすることは、噴火過程解明に寄与するため、多くの火山にて推定されるであろう。

一方、火口形成に伴う破壊エネルギーの直接推定は困難である。Nishimura and Hamaguchi (1993) は、噴火を完全気体の等エントロピー流で近似し、爆発地震のシング

ルフォースの大きさと継続時間を、火口半径、噴出速度、火道浅部内の圧力の関数で表し、爆発地震の運動エネルギーは火口半径の3乗と火道内圧の積に比例することを示した。ここで、火口の大きさは噴出量や噴出率に反映されるが、火道内圧は爆発直前の蓋の強度を反映している。断層による地震エネルギーは断層長の3乗と応力降下量の積に比例するが、岩石強度に大差が無いため応力降下量は地震毎の差はあまりない。しかし、噴火の場合は空振と噴火規模が比例せず、火口蓋の強度が有意に異なるだろうから、噴出物からの蓋の強度の測定が必要であろう。蓋の強度が大きい場合はその噴火は破壊エネルギーも空振エネルギーも大きくなるであろう。噴火毎の蓋の強度推定には、噴出物の高時間分解能サンプリングと分析 (Shimano *et al.*, 2013) が必要であろう。以上のことから、エネルギー分配に着目した噴火過程研究においては、多項目の地球物理学的手法の同時観測とともに、物質科学的観測も地球物理観測と同程度の時間分解能が求められる。

小屋口 (2008) は、エネルギーの変換の仕方が噴火様式を特徴付け、マグマの熱量から推定される熱エネルギーが運動エネルギーや地震エネルギーよりも圧倒的に大きいことから、噴火現象を一種の熱機関として捉え、マグマの熱エネルギーから力学的エネルギーへの変換過程の観点から噴火様式の多様性を整理すると見通しが良くなることを指摘している。そして、Walker (1980) が提唱した爆発的噴火の尺度のうち4つの「規模 (magnitude)」「強度 (intensity)」「散布力 (dispersive power)」「激しさ (violence)」は、「マグマの熱から変換された大気の力学的エネルギー」について、熱エネルギーの総量、熱エネルギーの供給率の上限、大気の力学的エネルギーとして変換された量、火道中で既に変換された力学的エネルギー量に対応づけられると指摘した (小屋口, 2008)。

本稿では、噴火をマグマ噴火と水蒸気噴火に分け、マグマ噴火を爆発性 (つまり噴出率) に着目してプリニー、ブルカノ、ストロンボリ、ハワイ、ドーム形成と分け、それぞれについて噴火過程についての観測研究を説明してきた。しかし、タイプ分けが困難で、読者と筆者では見解が異なるところもあるだろう。さらに言えば、マグマ噴火だろうが水蒸気噴火だろうが、火砕物が火口から外に出ることには変わりなく、その違いは本質物の含有率だけで、実際にブルカノ式噴火と水蒸気爆発では Fig. 10 に示した事例にもある通り噴出量と噴出率に大差ないだろう。ただし、マグマの関与の仕方が異なることから、両者の噴火過程は大きく異なる。水蒸気爆発では、高温マグマの熱によって、マグマ自身の質量の約1/3の質量の水が蒸発する。マグマと水の混合物は、発泡膨張

したマグマよりもさらに10倍程度膨張するため、マグマの熱エネルギーが効率よく力学的エネルギーに変換される (小屋口, 2008)。多様な研究事例があるブルカノ式噴火の過程と比較するためには水蒸気噴火の研究も進める必要があり、エネルギーの観点からは多項目の地球物理学的そして物質科学的な観測がますます重要となる。

謝 辞

東北大学の小園誠史氏と匿名査読者には、本稿の改善に有益なコメントをいただきました。本稿を執筆する機会を与えてくださった60周年事業委員会の皆さま並びに編集担当を務めてくださった東京大学の青木陽介氏に心より感謝申し上げます。

引用文献

- Aizawa, K., Ogawa, Y., Hashimoto, T., Koyama, T., Kanda, W., Yamaya, Y., Mishina, M. and Kagiya, T. (2008) Shallow resistivity structure of Asama volcano and its implications for magma ascent process in the 2004 eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **173**, 165–177, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.01.016.
- Alidibirov, M. and Dingwell, D.B. (1996) Magma fragmentation by rapid decompression. *Nature*, **380**, 146–148.
- Allard, P., Burton, M. and Muré, F. (2005) Spectroscopic evidence for a lava fountain driven by previously accumulated magmatic gas. *Nature*, **433**, 407–410, doi: 10.1038/nature03246.
- Anderson, K. and Segall, P. (2011) Physics-based models of ground deformation and extrusion rate at effusively erupting volcanoes. *J. Geophys. Res.*, **116**, B07204, doi: 10.1029/2010JB007939.
- Andronico, D. and Corsaro, R.A. (2011) Lava fountains during the episodic eruption of South-East crater (Mt. Etna), 2000: insights into magma-gas dynamics within the shallow volcano plumbing system. *Bull. Volcanol.*, **73**, 1165–1178, doi: 10.1007/s00445-011-0467-y.
- 青木陽介 (2016) 火山地殻変動観測の進展. 火山, **61**, in review.
- 青木陽介・渡辺秀文・小山悦郎・及川 純・森田裕一 (2005) 2004–2005 年浅間山火山活動に伴う地殻変動. 火山, **50**, 575–584.
- Aoki, Y. *et al.* (2009) P-wave velocity structure beneath Asama volcano, Japan, inferred from active source seismic experiment. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **187**, 272–277, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.09.004.
- 青山 裕 (2008) CMG40 T 地震計の傾斜応答に関する簡易試験. 火山, **53**, 35–46.
- Aoyama, H. and Oshima, H. (2008) Tilt change recorded by broadband seismometer prior to small phreatic explosion of Meakan-dake volcano, Hokkaido, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L06307, doi: 10.1029/2007GL032988.
- Aoyama, H. and Oshima, H. (2015) Precursory tilt changes of small phreatic eruptions of Meakan-dake volcano, Hokkaido,

- Japan, in November 2008. *Earth Planets Space*, **67**, 119, doi: 10.1186/s40623-015-0289-9.
- Barberi, F., Bertagnini, A., Landi, P. and Principe, C. (1992) A review on phreatic eruptions and their precursors. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **52**, 231–246.
- Barberi, F., Rosi, M. and Sodi, A. (1993) Volcanic hazard assessment at Stromboli based on review of historical data. *Acta Vulcanologica*, **3**, 173–187.
- Battaglia, J. and Aki, K. (2003) Location of seismic events and eruptive fissures on the Piton de la Fournaise volcano using seismic amplitudes. *J. Geophys. Res.*, **108**, **2364**, doi: 10.1029/2002JB002193.
- Battaglia, J., Aki, K. and Ferrazzini, V. (2005a) Location of tremor sources and estimation of lava output using tremor source amplitude on the Piton de la Fournaise volcano: 1. Location of tremor sources. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **147**, 268–290, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2005.04.006.
- Battaglia, J., Aki, K. and Staudacher, T. (2005b) Location of tremor sources and estimation of lava output using tremor source amplitude on the Piton de la Fournaise volcano: 2. Estimation of lava output. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **147**, 291–308, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2005.04.006.
- Bluth, G. J. S. and Rose, W. I. (2004) Observations of eruptive activity at Santiaguito volcano, Guatemala. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **136**, 297–302, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2004.06.001.
- Bonaccorso, A. and Calvari, S. (2013) Major effusive eruptions and recent lava fountains: Balance between expected and erupted magma volumes at Etna volcano. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, 6069–6073, doi: 10.1002/2013GL058291.
- Bonaccorso, A., Cannata, A., Corsaro, R. A., Di Grazia, G., Gambino, S., Greco, F., Miraglia, L. and Pistorio, A. (2011 a) Multidisciplinary investigation on a lava fountain preceding a flank eruption: The 10 May 2008 Etna case. *Geochem. Geophys. Geosy.*, **12**, Q07009, doi: 10.1029/2010GC003480.
- Bonaccorso, A., Bonforte, A., Calvari, S., Del Negro, C., Di Grazia, G., Ganci, G., Neri, M., Vicari, A. and Boschi, E. (2011b) The initial phases of the 2008–2009 Mount Etna eruption: A multidisciplinary approach for hazard assessment. *J. Geophys. Res.*, **116**, B03203, doi: 10.1029/2010JB007906.
- Bonaccorso, A., Calvari, S., Currenti, G., Del Negro, C., Ganci, G., Linde, A., Napoli, R., Sacks, S. and Sicali, A. (2013) From source to surface: dynamics of Etna's lava fountains investigated by continuous strain, magnetic, ground and satellite thermal data. *Bull. Volcanol.*, **75**, 690, doi: 10.1007/s00445-013-0690-9.
- Bonaccorso, A., Calvari, S., Linde, A. and Sacks, S. (2014) Eruptive processes leading to the most explosive lava fountain at Etna volcano: The 23 November 2013 episode. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 4912–4919, doi: 10.1002/2014GL060623.
- Braun, T. and Ripepe, M. (1993) Interaction of seismic and air waves recorded at Stromboli volcano. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 65–68.
- Brodsky, E., Kanamori, H. and Sturtevant, B. (1999) A seismically constrained mass discharge rate for the initiation of the May 18, 1980 Mount St. Helens eruption. *J. Geophys. Res.*, **104**, 29387–29400.
- Bull, K. F. and Buurman, H. (2013) An overview of the 2009 eruption of Redoubt volcano, Alaska. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **259**, 2–15, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.06.024.
- Calvari, S. *et al.* (2011) An unloading foam model to constrain Etna's 11–13 January 2011 lava fountaining episode. *J. Geophys. Res.*, **116**, B11207, doi: 10.1029/2011JB008407.
- Chouet, B. A., Hamsevicz, N. and McGetchin, T. R. (1974) Photoballistics of volcanic jet activity at Stromboli, Italy. *J. Geophys. Res.*, **79**, 4961–4976, doi: 10.1029/JB079i032p04961.
- Chouet, B., Dawson, P., Ohminato, T., Martini, M., Saccorotti, G., Giudicepietro, F., De Luca, G., Milana, G. and Scarpa, R. (2003) Source mechanisms of explosions at Stromboli volcano, Italy, determined from moment-tensor inversions of very-long-period data. *J. Geophys. Res.*, **108**, 2019, doi: 10.1029/2002JB001919.
- Chouet, B. A. and Matoza, R. S. (2013) A multi-decadal view of seismic methods for detecting precursors of magma movement and eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **252**, 108–175, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.11.013.
- Clarke, A. B., Voight, B., Neri, A. and Macedonio, G. (2002) Transient dynamics of vulcanian explosions and column collapse. *Nature*, **415**, 897–901.
- Costa, A., Wadge, G. and Melnik, O. (2012) Cyclic extrusion of a lava dome based on a stick-slip mechanism. *Earth. Planet. Sci. Lett.*, **337–338**, 39–46, doi: 10.1016/j.epsl.2012.05.011.
- Cruz-Atienza, V. M., Pacheco, J. F., Singh, S. K., Shapiro, N. M., Valdés, C. and Iglesias, A. (2001) Size of Popocatepetl volcano explosions (1997–2001) from waveform inversion. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 4027–4030.
- Dawson, P. B., Chouet, B. A. and Power, J. (2011) Determining the seismic source mechanisms and location for an explosive eruption with limited observational data: Augustine Volcano, Alaska. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L03302, doi: 10.1029/2010GL045977.
- Delle Donne, D. and Ripepe, M. (2012) High-frame rate thermal imagery of Strombolian explosions: Implications for explosive and infrasonic source dynamics. *J. Geophys. Res.*, **117**, B09206, doi: 10.1029/2011JB008987.
- Dmitrieva, K., Hotovec-Ellis, A. J., Prejean, S. and Dunham, E. M. (2013) Frictional-faulting model for harmonic tremor before Redoubt volcano eruptions. *Nature Geosci.*, **6**, 652–656, doi: 10.1038/ngeo1879.
- Fee, D. and Matoza, R. S. (2013) An overview of volcano infrasound: From Hawaiian to Plinian, local to global. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **249**, 123–139, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.09.002.
- Fee, D., Steffke, A. and Garces, M. (2010) Characterization of the 2008 Kasatochi and Okmok eruptions using remote infrasound arrays. *J. Geophys. Res.*, **115**, D00L10, doi: 10.1029/2009JD013621.
- Fee, D., Yokoo, A. and Johnson, J. B. (2014) Introduction to an open community infrasound dataset from the actively

- eruption Sakurajima volcano, Japan. *Seismol. Res. Lett.*, **85**, 1151–1162, doi: 10.1785/0220140051.
- Fujita, E., Ukawa, M., Yamamoto, E. and Okada, Y. (2002) Cyclic jerky opening of magma sheet and caldera formation during the 2000 Miyakejima volcano eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1366, doi: 10.1029/2001GL013848.
- Fujita, E., Ukawa, M. and Yamamoto, E. (2004) Subsurface cyclic magma sill expansions in the 2000 Miyakejima volcano eruption: Possibility of two-phase flow oscillation. *J. Geophys. Res.*, **109**, B04205, doi: 10.1029/2003JB002556.
- Genco, R. and Ripepe, M. (2010) Inflation-deflation cycles revealed by tilt and seismic records at Stromboli volcano. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L12302, doi: 10.1029/2010GL042925.
- Genco, R., Ripepe, M., Marchetti, E., Bonadonna, C. and Biass, S. (2014) Acoustic wavefield and Mach wave radiation of flashing arcs in Strombolian explosion measured by image luminance. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 7135–7142, doi: 10.1002/2014GL061597.
- Germanovich, L. N. and Lowell, R. P. (1995) The mechanism of phreatic eruptions. *J. Geophys. Res.*, **100**, 8417–8434.
- Geshi, N., Shimano, T., Chiba, T. and Nakada, S. (2002) Caldera collapse during the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan. *Bull. Volcanol.*, **64**, 55–68, doi: 10.1007/s00445-001-0184-z.
- Gibbons, S. J. and Ringdal, F. (2006) The detection of low magnitude seismic events using array-based waveform correlation. *Geophys. J. Int.*, **165**, 149–166, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02865.x.
- Giudicepietro, F., D'Auria, L., Martini, M., Caputo, T. Peluso, R., De Cesare, W., Orazi, M. and Scarpato, G. (2009) Changes in the VLP seismic source during the 2007 Stromboli eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **182**, 162–171, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.11.008.
- Goto, A. (1999) A new model for volcanic earthquake at Unzen volcano: Melt rupture model. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 2541–2544.
- Goto, A., Ripepe, M. and Laccana, G. (2014) Wideband acoustic records of explosive volcanic eruptions at Stromboli: New insights on the explosive process and the acoustic source. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 3851–3857, doi: 10.1002/2014GL060143.
- Green, D. N. and Neuberg, J. (2006) Waveform classification of volcanic low-frequency earthquake swarms and its implication at Soufrière Hills volcano, Montserrat. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **153**, 51–63.
- 浜口博之・植木貞人 (2012) 1888 年磐梯山水蒸気爆発に関するノート: (1) 爆発源の位置と噴出方向に関する再検討. 火山, **57**, 111–123.
- 浜口博之・植木貞人・中道治久 (2014) 1888 年磐梯山水蒸気爆発に関するノート: (3) 1888 年の水蒸気爆発論考に潜むジレンマ. 火山, **59**, 287–298.
- Harris, A. J. L., Ripepe, M. and Hughes, E. A. (2012) Detailed analysis of particle launch velocities, size distributions and gas densities during normal explosions at Stromboli. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **231–232**, 109–131, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.02.012.
- 橋本武志 (2005) 火山の電磁気観測—歴史・意義・展望—. 火山, **50**, S115–S138.
- Hautmann, S., Hidayat, D., Fournier, N., Linde, A. T., Sacks, I. S. and Williams, C. P. (2013) Pressure changes in the magmatic system during the December 2008/January 2009 extrusion event at Soufrière Hills volcano, Montserrat (W. I.), derived from strain data analysis. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **250**, 34–41, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.10.006.
- Hibert, C. *et al.* (2015) Toward continuous quantification of lava extrusion rate: Results from the multidisciplinary analysis of the 2 January 2010 eruption of Piton de la Fournaise volcano, La Réunion. *J. Geophys. Res.*, **120**, 3026–3047, doi: 10.1002/2014JB011769.
- 廣瀬 亘・他 (2007) 2006 年 (平成 18 年) 3 月の雌阿寒岳噴火: 噴火の経過および降灰調査結果. 道立地質研報告, **78**, 37–55.
- Holland, A. S. P., Watson, L. M., Phillips, J. C., Caricchi, L. and Dalton, M. P. (2011) Degassing processes during lava dome growth: Insights from Santiaguito lava dome, Guatemala. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **202**, 153–166, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.02.004.
- Hornby, A. J. *et al.* (2015) Spine growth and seismogenic faulting at Mt. Unzen, Japan. *J. Geophys. Res.*, **120**, 4034–4054, doi: 10.1002/2014JB011660.
- Hort, M., Seyfried, R. and Vöge, M. (2003) Rader Doppler velocimetry of volcanic eruptions: theoretical considerations and quantitative documentation of changes in eruptive behavior at Stromboli volcano, Italy. *Geophys. J. Int.*, **154**, 515–532.
- Hotovec, A. J., G. Prejean, S. G., Vidale, J. E. and Gombert, J. (2013) Strongly gliding harmonic tremor during the 2009 eruption of Redoubt volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **259**, 89–99, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2012.01.001.
- Ichihara, M., Rittel, D. and Sturtevant, B. (2002) Fragmentation of a porous viscoelastic material: Implications to magma fragmentation. *J. Geophys. Res.*, **107** (B10), 2229, doi: 10.1029/2001JB000591.
- Ichihara, M., Takeo, M., Yokoo, A., Oikawa, J. and Ohminato, T. (2012) Monitoring volcanic activity using correlation patterns between infrasound and ground motion. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L04304, doi: 10.1029/2011GL050542.
- Ichihara, M., Lyons, J. J. and Yokoo, A. (2013) Switching from seismic to seismo-acoustic harmonic tremor at a transition of eruptive activity during the Shinmoe-dake 2011 eruption. *Earth Planets Space*, **65**, 633–643, doi: 10.5047/eps.2013.05.003.
- Ide, S., Baltay, A. and Beroza, G. C. (2011) Shallow dynamic overshoot and energetic deep rupture in the 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oiki earthquake. *Science*, **332**, 1426–1429.
- Iguchi, M. (1994) A vertical expansion source model for the mechanisms of earthquakes originated in the magma conduit of an andesitic volcano: Sakurajima, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **39**, 49–67.
- 井口正人 (2005) 地球物理学の観測からみた火山爆発のダイナミクス—桜島を例として—. 火山, **50**, S137–

- S149.
- Iguchi, M. (2013) Magma movement from the deep to shallow Sakurajima volcano as revealed by geophysical observations. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58**, 1, 1–18.
- 井口正人 (2013a) 桜島火山の噴火活動— 2012 年 7 月～2013 年 6 月—。桜島火山における多項目観測に基づく火山噴火準備過程解明のための研究平成 24 年度報告書, 1–8.
- 井口正人 (2013b) 噴火微動を用いた火山灰放出量のモニタリング手法。京都大学防災研究所年報, **56B**, 221–225.
- 井口正人・為栗 健 (2014) 桜島昭和火口の 2013 年 8 月 18 日噴火について。京都大学防災研究所年報, **57B**, 106–115.
- 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.
- Iguchi, M., Tameguri, T., Ohta, Y., Ueki, S. and Nakao, S. (2013) Characteristics of volcanic activity at Sakurajima volcano's Showa crater during the period 2006 to 2011. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **58**, 115–135.
- Ishihara, K. (1985) Dynamical analysis of volcanic explosion. *J. Geodyn.*, **3**, 327–349.
- Ishihara, K. (1990) Pressure sources and induced ground deformation associated with explosive eruptions at an andesitic volcano: Sakurajima volcano, Japan. In *Magma Transport and Storage* (Ryan, M. ed), John Wileys & Sons, Chichester, 335–356.
- 石原和弘・小林哲夫 (1988) 桜島火山の最近の火山活動。火山, **33**, 269–271.
- 石丸 聡・他 (2009) 2008 年 11 月に噴火した雌阿寒岳の調査報告。道立地質研報告, **80**, 115–126.
- 石峯康浩・瀧本浩史・神田 学・木下紀正・横尾亮彦・井口正人 (2009) 桜島火山・昭和火口で発生した噴煙の PIV 解析。京都大学防災研究所年報, **52B**, 319–322.
- Iverson, R. M. *et al.* (2006) Dynamics of seismogenic volcanic extrusion at Mount St Helens in 2004–05. *Nature*, **444**, 439–443, doi: 10.1038/nature05322.
- James, M. R., Lane, S. J. and Corder, S. B. (2008) Modelling the rapid near-surface expansion of gas slugs in low-viscosity magmas. In *Fluid Motions in Volcanic Conduits: A Source of Seismic and Acoustic Signals* (Lane, S. J. and Gilbert, J. S. eds), Geological Society, London, Special Publications, **307**, 147–167, doi: 10.1144/SP307.9.
- Jaupart, C. and Vergnolle, S. (1988) Laboratory models of Hawaiian and Strombolian eruptions. *Nature*, **331**, 58–60.
- Jaupart, C. and Vergnolle, S. (1989) The generation and collapse of a foam layer at the roof of a basaltic magma chamber. *J. Fluid. Mech.*, **203**, 347–380.
- Jellinek, A. and Bercovici, D. (2011) Seismic tremors and magma wagging during explosive volcanism. *Nature*, **470**, 522–525, doi: 10.1038/nature09828.
- Johnson, J. B. (2005) Source location variability and volcanic vent mapping with a small-aperture infrasound array at Stromboli volcano, Italy. *Bull. Volcanol.*, **67**, 1–14, doi: 10.1007/ss00445-004-0356-8.
- Johnson, J. B. and Aster, R. C. (2005) Relative partitioning of acoustic and seismic energy during Strombolian eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **148**, 334–354, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2005.05.002.
- Johnson, J. B. and Malone, S. D. (2007) Ground-coupled acoustic airwaves from Mount St. Helens provides constraints on the May 18th, 1980 eruption. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **258**, 16–31, doi: 10.1016/j.epsl.2007.03.001.
- Johnson, J. B. and Ripepe, M. (2011) Volcano infrasound: A review. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **206**, 3–4, 61–69, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.06.006.
- Johnson, J. B., Lees, J. M., Gerst, A., Sahagian, D. and Varley, N. (2008) Long-period earthquakes and co-eruptive dome inflation seen with particle image velocimetry. *Nature*, **456**, 377–381, doi: 10.1038/nature07429.
- Johnson, J. B., Sanderson, R. Lyons, J., Escobar-Wolf, R. Waite, G. and Lees, J. M. (2009) Dissection of a composite volcanic earthquake at Santiaguito, Guatemala. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L16308, doi: 10.1029/2009GL039370.
- Johnson, J. B., Lyons, J. J., Andrews, B. J. and Lees, J. M. (2014) Explosive dome eruptions modulated by periodic gas-driven inflation. *Geophys. Res. Lett.*, **41**, 6689–6697, doi: 10.1002/2014GL061310.
- Jolly, A. D., Sherburn, S., Jousset, P. and Kilgour, G. (2010) Eruption source processes derived from seismic and acoustic observations of the 25 September 2007 Ruapehu eruption-North Island, New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **191**, 33–45, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.01.009.
- Kanamori, H. and Given, J. W. (1982) Analysis of long-period seismic waves excited by the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens – A terrestrial monopole? *J. Geophys. Res.*, **87**, 5422–5432.
- Kanamori, H. and Mori, J. (1992) Harmonic excitation of mantle Rayleigh waves by the 1991 eruption of Mount Pinatubo, Philippines. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 7, 721–724.
- Kanamori, H. and Brodsky, E. E. (2004) The physics of earthquakes. *Rep. Prog. Phys.*, **67**, 1429–1496, doi: 10.1088/0034-4885/67/8/R03.
- Kanamori, H. and Rivera, L. (2006) Energy partitioning during an earthquake. In *Earthquakes: Radiated Energy and the Physics of Faulting* (Abercrombie, R., McGarr, A., Di Toro, G. and Kanamori, H. eds), American Geophysical Union, Washington, D. C., doi: 10.1029/170GM03.
- Kanamori, H., Given, J. W. and Lay, T. (1984) Analysis of seismic body waves excited by the Mount St. Helens eruption of May 18, 1980. *J. Geophys. Res.*, **89**, 1856–1866.
- 金子隆之 (2005) 衛星リモートセンシングによる火山の赤外観測。火山, **50**, S233–S251.
- Kaneshima, S. *et al.* (1996) Mechanism of phreatic eruptions at Aso volcano inferred from near-field broadband seismic observations. *Science*, **273**, 642–645.
- Kato, A., Terakawa, T., Yamanaka, Y., Maeda, Y., Horikawa, S., Matsuhira, K. and Okuda, T. (2015) Preparatory and precursory processes leading up to the 2014 phreatic eruption of Mount Ontake, Japan. *Earth Planets Space*, **67**, 111, doi: 10.1186/s40623-015-0228-x.

- Kato, K. and Yamasato, H. (2013) The 2011 eruptive activity of Shinmoedake volcano, Kirishimayama, Kyushu, Japan Overview of activity and Volcanic Alert Level of the Japan Meteorological Agency-. *Earth Planets Space*, **65**, 489–504, doi: 10.5047/eps.2013.05.009.
- 加藤幸司・大島弘光・笹谷 努 (2002) 1988–1989 年の十勝岳噴火に伴う爆発地震の震源メカニズム. 北海道大学地球物理学研究報告, **65**, 179–198.
- Kawaguchi, R. and Nishimura, T. (2015) Numerical investigation of temporal changes in volcanic deformation caused by a gas slug ascent in the conduit. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **302**, 1–10, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2015.06.002.
- Kawaguchi, R., Nishimura, T. and Sato, H. (2013) Volcano inflation prior to an eruption: Numerical simulations based on a 1-D magma flow model in an open conduit. *Earth Planets Space*, **65**, 1477–1489, doi: 10.5047/eps.2013.05.005.
- Kawakatsu, H. and Yamamoto, M. (2007) Volcano Seismology. In *Treatise on Geophysics. 4: Earthquake Seismology* (Schubert, G. ed), 389–420, Elsevier, Oxford.
- 風早竜之介・森 俊哉 (2016) 火山ガス観測研究から見る地下のマグマ挙動および噴火現象の解釈, 火山, **61**, 155–170.
- Kazahaya, R., Mori, T., Takeo, M., Ohminato, T., Urabe, T. and Maeda, Y. (2011) Relation between single very-long-period pulses and volcanic gas emissions at Mt Asama, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, L11307, doi: 10.1029/2011GL047555.
- Kazama, T., Okubo, S., Sugano, T., Matsumoto, S., Sun, W., Tanaka, Y. and Koyama, E. (2015) Absolute gravity change associated with magma movement in the conduit of Asama Volcano (Central Japan), revealed by physical modeling of hydrological gravity disturbances. *J. Geophys. Res.*, **120**, 1263–1287, doi: 10.1002/2014JB011563.
- Kendrick, J. E., Lavallée, Y., Hirose, T., Di Toro, G., Hornby, A. J., De Angelis, S. and Dingwell, D. B. (2014) Volcanic drumbeat seismicity caused by stick-slip motion and magmatic frictional melting. *Nature Geosci.*, **7**, 438–442, doi: 10.1038/ngeo2146.
- 菊地正幸・山中佳子・瀧澤一起 (2001) 三宅島 2000 年噴火活動に伴う長周期地震のメカニズムとその解釈. 地学雑誌, **110**, 204–216.
- Kim, K., Lees, J. M. and Ruiz, M. C. (2014) Source mechanisms of Vulcania eruption at Tungurahua Volcano, Ecuador, derived from seismic moment tensor inversions. *J. Geophys. Res.*, **119**, 1145–1164, doi: 10.1002/2013JB010590.
- Kim, K., Fee, D., Yokoo, A. and Lees, J. M. (2015) Acoustic source inversion to estimate volume flux from volcanic explosions. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 5243–5249, doi: 10.1002/2015GL064466.
- Kirchdörfer, M. (1999) Analysis and quasistatic FE modeling of long period impulsive events associated with explosions at Stromboli volcano (Italy). *Ann. Geofisica*, **42**, 379–390.
- 気象庁 (2013) 日本活火山総覧 (第 4 版).
- Kobayashi, T., Ida, Y. and Ohminato, T. (2005) Small inflation sources producing seismic and infrasonic pulses during the 2000 eruptions of Miyake-jima, Japan. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **240**, 291–301, doi: 10.1016/j.epsl.2005.09.015.
- Kobayashi, T., Ohminato, T., Ida, Y. and Fujita, E. (2009) Very long period seismic signals observed before the caldera formation with the 2000 Miyake-jima volcanic activity, Japan. *J. Geophys. Res.*, **114**, B02211, doi: 10.1029/2007JB005557.
- 小屋口剛博 (1995) 火山現象の素過程の理解から火山システムの理解へ. 火山, **40**, S111–S123.
- 小屋口剛博 (2008) 火山現象のモデリング. 東京大学出版会, 638 p.
- Koyaguchi, T. and Mitani, N. K. (2005) A theoretical model for fragmentation of viscous bubbly magmas in shock tubes. *J. Geophys. Res.*, **110**, B10202, doi: 10.1029/2004JB003513.
- 小園誠史・三谷典子 (2006) 一次元定常火道流のモデリング・総説. 岩石鉱物科学, **35**, 166–176.
- Kozono, T., Ueda, H., Ozawa, T., Koyaguchi, T., Fujita, E. Tomiya A. and Suzuki, Y. J. (2013) Magma discharge variations during the 2011 eruptions of Shinmoe-dake volcano, Japan, revealed by geodetic and satellite observations. *Bull. Volcanol.*, **75**, 695, doi: 10.1007/s00445-013-0695-4.
- Kozono, T., Ueda, H., Shimbori, T. and Fukui, K. (2014) Correlation between magma chamber deflation and eruption cloud height during the 2011 Shinmoe-dake eruptions. *Earth, Planets and Space*, **66**, 139, doi: 10.1186/s40623-014-0139-1.
- 熊谷博之・中野 優 (2009) 火山性地震の発生過程一定量化に関する最近の成果—. 地震, **61**, S379–S390.
- Kumagai, H., Ohminato, T., Nakano, M., Ooi, M., Kubo, A., Inoue, H. and Oikawa, J. (2001) Very-long-period seismic signals and caldera formation at Miyake Island, Japan. *Science*, **293**, 687–689.
- Kumagai, H. et al. (2010) Broadband seismic monitoring of active volcanoes using deterministic and stochastic approaches. *J. Geophys. Res.*, **115**, B08303, doi: 10.1029/2009JB006889.
- Lees, J. M. (2007) Seismic tomography of magmatic systems. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **167**, 37–56, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2007.06.008.
- Mader, H. M., Zhang, Y., Phillips, J. C., Sparks, R. S. J., Sturtevant, B. and Stolper, E. (1994) Experimental simulations of explosive degassing of magma. *Nature*, **372**, 85–88.
- Maeda, Y. and Takeo, M. (2011) Very-long-period pulses at Asama volcano, central Japan, inferred from dense seismic observations. *Geophys. J. Int.*, **185**, 265–282, doi: 10.1111/j.1365-246X.2011/04938.x.
- Maeda, Y., Takeo, M. and Ohminato, T. (2011) A waveform inversion including tilt: method and simple tests. *Geophys. J. Int.*, **184**, 2, 907–918, doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04892.x.
- Maeda, Y., Kumagai, H., Lacson Jr., R., Flgueroa II, M. S., Yamashina, T., Ohkura, T. and Baloloy, A. V. (2014) A phreatic explosion model inferred from a very long period seismic event at Mayon Volcano, Philippines. *J. Geophys. Res.*, **120**, 226–242, doi: 10.1002/2014JB011440.
- Maeno, F. et al. (2016) Reconstruction of a phreatic eruption on 27 September 2014 at Ontake volcano, Central Japan, based on proximal pyroclastic density current and fall out

- deposits. *Earth Planets Space*, in review.
- Marchetti, E. and Ripepe, M. (2005) Stability of the seismic source during effusive and explosive activity at Stromboli volcano. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L03307, doi: 10.1029/2004GL021406.
- Martin, L. G. *et al.* (2009) A multidisciplinary effort to assign realistic source parameters to models of volcanic ash-cloud transport and dispersion during eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **186**, 10–21, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.01.008.
- Matzoa, R. S., Fee, D., Garcés, M. A., Seiner, J. M., Ramón, P. A. and Hedlin, M. A. H. (2009) Infrasonic jet noise from volcanic eruptions. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L08303, doi: 10.1029/2008GL036486.
- Matzoa, R. S., Le Pichon, A., Vergoz, J., Herry, P., Lalande, J., Lee, H., Che, I. and Rybin, A. (2011) Infrasonic observations of the June 2009 Sarychev Peak eruption, Kuril Islands: Implications for infrasonic monitoring of remote explosive volcanism. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **200**, 35–48, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.11.022.
- Matsumoto, N., Sato, T., Matsushima, N., Akita, F., Shibata, T. and Suzuki, A. (2002) Hydrological anomalies associated with crustal deformation before the 2000 eruption of Usu volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1057, doi: 10.1029/2001GL013968.
- Matsumoto, S., Shimizu, H., Matsushima, T., Uehira, K., Yamashita, Y., Nakamoto, M., Miyazaki, M. and Chikura, H. (2013) Short-term spatial change in a volcanic tremor source during the 2011 Kirishima eruption. *Earth Planets Space*, **65**, 323–329, doi: 10.5047/eps.2012.09.002.
- McKee, K., Fee, D., Rowell, C. and Yokoo, A. (2014) Network-based evaluation of the infrasonic source location at Sakurajima volcano, Japan. *Seismol. Res. Lett.*, **85**, 1151–1162, doi: 10.1785/0220140051.
- McNutt, S. R. and Nishimura, T. (2008) Volcanic tremor during eruptions: Temporal characteristics, scaling and constraints on conduit size and processes. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **178**, 1, 10–18, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.010.
- Melnik, O. and Sparks, R. S. J. (1999) Nonlinear dynamics of lava dome extrusion. *Nature*, **402**, 37–41, doi: 10.1038/46950.
- Melnik, O. and Sparks, R. S. J. (2005) Controls on conduit magma flow dynamics during lava dome building eruptions. *J. Geophys. Res.*, **110**, B02209, doi: 10.1029/2004JB003183.
- Michaut, C., Ricard, Y., Bercovici, D. and Sparks, R. S. J. (2013) Eruption cyclicity at silicic volcanoes potentially caused by magmatic gas waves. *Nature Geosci.*, **6**, 856–860, doi: 10.1038/ngeo1928.
- Michon, L., Massin, F., Famin, V. and Ferrazzini, V. (2011) Basaltic calderas: Collapse dynamics, edifice deformation, and variations of magma withdrawal. *J. Geophys. Res.*, **116**, B03209, doi: 10.1029/2010JB007636.
- 三浦大輔・新井田清信 (2002) 有珠火山 2000 年噴火における岩脈貫入過程と潜在ドームの形成メカニズム. 火山, **47**, 119–130.
- 森田裕一・大湊隆雄 (2005) 火山における地震観測の発展と成果. 火山, **50**, S77–S100.
- Morrissey, M., Garcés, M., Ishihara, K. and Iguchi, M. (2008) Analysis of infrasonic and seismic events related to the 1998 Vulcanian eruption at Sakurajima. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **175**, 315–324, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.008.
- Morrissey, M. M. and Lastin, L. G. (2000) Vulcanian eruptions. In *Encyclopedia of Volcanoes*, 463–475.
- 村上 亮 (2005a) 最近 10 年の地殻変動観測の進歩と火山学への貢献. 火山, **50**, S27–S47.
- 村上 亮 (2005b) GPS 連続観測結果が示唆する浅間火山のマグマ供給系. 火山, **50**, 347–361.
- 中田節也・吉本充宏・小山悦朗・辻 浩・卜部 卓 (2005) 浅間山 2004 年噴火と過去の噴火との比較による活動評価. 火山, **50**, 303–313.
- Nakada, S., Shimizu, H. and Ohta, K. (1999) Overview of the 1990–1995 eruption at Unzen volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **89**, 1–22.
- 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, doi: 10.5047/eps.2013.03.016.
- Nakada, S., Yoshimoto, M., Maeno, F., Iguchi, M., Zaenudin, A. and Hendrasto, M. (2014) Recent two distinct eruptions at Sinabung and Kelud, Indonesia. American Geophysical Union Fall Meeting, V33E-06.
- Nakamichi, H., Kumagai, H., Nakano, M., Okubo, M., Kimata, F., Ito, Y. and Obara, K. (2009) Source mechanism of a very-long-period event at Mt Ontake, central Japan: Response of a hydrothermal system to magma intrusion beneath the summit. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **187**, 167–177, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.09.006.
- Nakamichi, H., Yamanaka, Y., Terakawa, T., Horikawa, S., Okuda, T. and Yamazaki, F. (2013) Continuous long-term array analysis of seismic records observed during the 2011 Shinmoedake eruption activity of Kirishima volcano, southwest Japan. *Earth Planets Space*, **65**, 551–562, doi: 10.5047/eps.2013.03.002.
- Neuberg, J. (2000) Characteristics and causes of shallow seismicity in andesite volcanoes. *Phil. Trans. Math. Phys. Eng. Sci.*, **358**, 1533–1546.
- Neuberg, J., Luckett, R., Ripepe, M. and Braun, T. (1994) Highlights from a seismic broadband array on Stromboli volcano. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 749–752.
- Neuberg, J., Luckett, R., Baptie, B. and Olsen, K. (2000) Models of tremor and low-frequency earthquake swarms on Montserrat. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **101**, 83–104.
- Neuberg, J. W., Tuffen, H., Collier, L., Green, D., Powell, T. and Dingwell, D. (2006) The trigger mechanism of low-frequency earthquakes on Montserrat. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **153**, 37–50, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2005.08.008.
- Newhall, C. G. and Self, S. (1982) The Volcanic Explosivity Index (VEI): An estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *J. Geophys. Res.*, **87**, C2, 1231–1238, doi: 10.1029/JC087iC02p01231.
- Nishimura, T. (2006) Ground deformation due to magma

- ascent with and without degassing. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L23309, doi: 10.1029/2006GL028101.
- Nishimura, T. (2009) Ground deformation caused by magma ascent in an open conduit. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **187**, 178–192, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.09.001.
- Nishimura, T. and Hamaguchi, H. (1993) Scaling law of volcanic explosion earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **20**, 2479–2482.
- Nishimura, T., Iguchi, M., Kawaguchi, R., Surono, Hendrasto, M. and Rosadi, U. (2012) Inflation prior to Vulcanian eruptions and gas bursts detected by tilt observations at Semeru Volcano, Indonesia. *Bull. Volcanol.*, **74**, 903–911, doi: 10.1007/s00445-012-0579-z.
- Nishimura, T., Iguchi, M., Yakiwara, H., Oikawa, J., Kawaguchi, R., Aoyama, H., Nakamichi, H., Ohta, Y. and Tameguri, T. (2013) Mechanisms of small vulcanian eruptions at Suwanosejima volcano, Japan, as inferred from precursor inflations and tremor signals. *Bull. Volcanol.*, **75**, 779, doi: 10.1007/s00445-013-0779-1.
- Ogiso, M. and Yomogida, K. (2012) Migration of tremor locations before the 2008 eruption of Meakandake volcano, Hokkaido, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **217–218**, 8–20, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.12.005.
- Ohminato, T., Takeo, M., Kumagai, H., Yamashina, T., Oikawa, J., Koyama, E., Tsuji, H. and Urabe, T. (2006) Vulcanian eruptions with dominant single force components observed during the Asama 2004 volcanic activity in Japan. *Earth Planets Space*, **58**, 583–593.
- 及川輝樹・他 (2015) 御嶽山 2014 年噴火. 火山, **60**, 411–415.
- Okada, Hm., Watanabe, H., Yamashita, H. and Yokoyama, I. (1981) Seismological significance of the 1977–1978 eruptions and the magma intrusion process of Usu volcano, Hokkaido. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **9**, 311–334.
- 岡田 弘 (1986) 火山観測と噴火予知. 火山, **30**, S301–S325.
- 岡崎紀俊・高橋浩晃・笠原 稔・石丸 聡・森 済・北川貞之・藤原健治・中禮正明 (2002) 高密度 GPS 観測による 2000 年有珠山噴火の地殻変動. 火山, **47**, 547–557.
- 大久保修平 (2005) 重力変化から火山活動を探る一観測・理論・解析一. 火山, **50**, S49–S58.
- Okubo, S., Tanaka, Y., Ueki, S., Oshima, H., Maekawa, T. and Imanishi, Y. (2013) Gravity variation around Shinmoe-dake volcano from February 2011 through March 2012—Results of continuous absolute gravity observation and repeated hybrid gravity measurements. *Earth Planets Space*, **65**, 563–571, doi: 10.5047/eps.2013.03.014.
- Omori, F. (1914–1922) The Sakura-jima eruptions and earthquakes, I, II, III, IV, V and VI. *Bull. Earthq. Invest. Commun.*, **8**, 1–34, 35–179, 181–321, 323–343, 353–466, 467–525.
- Onizawa, S., Mikada, H., Watanabe, H. and Sakashita, S. (2002) A method for simultaneous velocity and density inversion and its application to exploration of subsurface structure beneath Izu-Oshima volcano, Japan. *Earth Planets Space*, **54**, 803–817, doi: 10.1186/BF03352074.
- Onizawa, S. *et al.* (2007) P-wave velocity structure of Usu volcano: Implication of structural controls on magma movements and eruption locations. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **160**, 175–194, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2006.10.005.
- Papale, P. and Dobran, F. (1993) Modeling of the ascent of magma during the plinian eruption of Vesuvius in A.D. 79. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **58**, 101–132.
- Parcheta, C., Houghton, B. and Swanson, D.A. (2012) Hawaiian fissure fountains 1: decoding deposits – episode 1 of the 1969–1974 Mauna Ulu eruption. *Bull. Volcanol.*, **74**, 1729–1743, doi: 10.1007/s00445-012-0621-1.
- Parfitt, E.A. (2004) A discussion of the mechanisms of explosive basaltic eruptions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **134**, 77–107, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2004.01.002.
- Parfitt, E.A. and Wilson, L. (1995) Explosive volcanic eruptions – IX. The transition between Hawaiian-style lava fountaining and Strombolian explosive activity. *Geophys. J. Int.*, **121**, 226–232.
- Patrick, M.R., Harris, A.J.L., Ripepe, M., Dehn, J., Rothery, D.A. and Calvari, S. (2007) Strombolian explosive styles and source conditions: insights from thermal (FLIR) video. *Bull. Volcanol.*, **69**, 769–784, doi: 10.1007/s00445-006-0107-0.
- Prejean, S.G. and Brodsky, E.E. (2011) Volcanic plume height measured by seismic waves based on a mechanical model. *J. Geophys. Res.*, **116**, B01306, doi: 10.1029/2010JB007620.
- Rice, J.R., Lapusta, N. and Ranjith, K. (2001) Rate and state dependent friction and the stability of sliding between elastically deformable solids. *J. Mech. Phys. Solids*, **49**, 1865–1898.
- Ripepe, M. and Marchetti, E. (2002) Array tracking of infrasonic sources at Stromboli volcano. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 2076, doi: 10.1029/2002GL015452.
- Ripepe, M., Rossi, M. and Saccorotti, G. (1993) Image processing of explosive activity at Stromboli. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **54**, 335–351.
- Ripepe, M., Poggi, P., Braun T. and Gordeev, E. (1996) Infrasonic waves and volcanic tremor at Stromboli. *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 181–184.
- Ripepe, M., Ciliberto, S. and Della Schiava, M. (2001) Time constraints for modeling source dynamics of volcanic explosions at Stromboli. *J. Geophys. Res.*, **106**, 8713–8727.
- Ripepe, M., Harris, A.J.L. and Carniel, R. (2002) Thermal, seismic and infrasonic evidences of variable degassing rates at Stromboli volcano. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **118**, 285–297.
- Ripepe, M., Delle Donne, D., Genco, R., Maggio, G., Pistolesi, M., Marchetti, E., Lacanna, G., Ulivieri, G. and Poggi, P. (2015) Volcano seismicity and ground deformation unveil the gravity-driven magma discharge dynamics of a volcanic eruption. *Nature Comm.*, **6**, 6998, doi: 10.1038/ncomms7998.
- Roman, D.C., De Angelis, S., Latchman, J.L. and White, R. (2008) Patterns of volcanotectonic seismicity and stress during the ongoing eruption of the Soufrière Hills volcano, Montserrat (1995–2007). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **173**,

- 230–244, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.01.014.
- Rybin, A., Chibisova, M., Webley, P., Steensen, T., Izbekov P., Neal, C. and Realmuto, V. (2011) Satellite and ground observations of the June 2009 eruption of Sarychev Peak volcano, Matua Island, Central Kuriles. *Bull. Volcanol.*, **73**, 1377–1392, doi: 10.1007/s00445-011-0481-0.
- Savage, M., Ohminato, T., Aoki, Y., Tsuji, H. and Greve, S. M. (2010) Stress magnitude and its temporal variation at Mt. Asama volcano, Japan, from seismic anisotropy and GPS. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **290**, 403–414, doi: 10.1016/j.epsl.2009.12.037.
- Scharff, L., Hort, M., Harris, A. J. L., Ripepe, M., Lees, J. M. and Seyfried, R. (2008) Eruption dynamics of the SW crater of Stromboli volcano, Italy— and interdisciplinary approach. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **176**, 565–570, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.05.008.
- Shibata, T. and Akita, F. (2001) Precursory changes in well water level prior to the March, 2000 eruption of Usu volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 1799–1802, doi: 10.1029/2000GL012467.
- Shimano, T., Nishimura, T., Chiga, N., Shibasaki, Y., Iguchi, M., Miki, D. and Yokoo, A. (2013) Development of an automatic volcanic ash sampling 1 apparatus for active volcanoes. *Bull. Volcanol.*, **75**, 773, doi: 10.1007/s00445-013-0773-7.
- 下鶴大輔 (1965) 日本における火山観測の現状: 大学, 研究所関係. 火山, 10 周年特集号, 129–132.
- 下鶴大輔 (1975) 火山観測と噴火予知. 火山, 20 周年特集号, 223–228.
- 下鶴大輔・荒牧重雄・井田喜明 (1995) 火山の事典. 朝倉書店, 590 p.
- 篠原宏志 (2005) 火山ガス観測による噴火予知研究の現状と展望. 火山, **50**, S167–S176.
- Sparks, R. S. J., Bursik, M. I., Carey, S. N., Gilbert, J. S., Glaze, L. S., Sigurdsson, H. and Woods, A. W (1997) Volcanic Plumes. John Wiley & Sons, Chichester, 574 p.
- Staudacher, T., Ferrazzini, V., Peltier, A., Kowalski, P., Boissier, P., Catherine, P., Lauret, F. and Massin F. (2009) The April 2007 eruption and the Dolomieu crater collapse, two major events at Piton de la Fournaise (La Réunion Island, Indian Ocean). *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **184**, 126–137, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.11.005.
- 諏訪 彰 (1965) 気象庁による火山観測の沿革と現状. 火山, 10 周年特集号, 133–138.
- 諏訪 彰 (1978) 日本の火山活動とその監視. 火山, **23**, 83–89.
- Taddeucci, J., Scarlato, P., Capponi, A., Del Bello, E., Cimarelli, C. and Palladino, D. M. (2012) High-speed imaging of Strombolian explosions: The ejection velocity of pyroclasts. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L02301, doi: 10.1029/2011GL050404.
- Takahashi, H., Shibata, T., Yamaguchi, T., Ikeda, R., Okazaki, N. and Akita, F. (2012) Volcanic strain change prior to an earthquake swarm observed by groundwater level sensors in Meakan-dake, Hokkaido, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **215–216**, 1–7, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.11.006.
- Takeo, M., Aoki, Y., Ohminato, T. and Yamamoto, M. (2006) Magma supply path beneath Mt. Asama volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L15310, doi: 10.1029/2006GL026247.
- Takeo, M., Machara, Y., Ichihara, M., Ohminato, T., Kamata, R. and Oikawa, J. (2013) Ground deformations cycles in a magma-effusive stage, and sub-Plinian and Vulcanian eruptions at Kirishima volcanoes, Japan. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, **118**, 4758–4773, doi: 10.1002/jgrb.50278.
- Tameguri, T., Iguchi, M. and Ishihara, K. (2002) Mechanisms of explosive eruptions from moment tensor analyses of explosion earthquakes at Sakurajima volcano, Japan. *Bull. Volcanol. Soc. Japan*, **47**, 197–215.
- Tanaka, H. K. M., Nakano, T., Takahashi, S., Yoshida, J., Ohshima, H., Maekawa, T., Watanabe, H. and Niwa, K. (2007) Imaging the conduit size of the dome with cosmic-ray muons: The structure beneath Showa-Shinzan Lava Dome, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L22311, doi: 10.1029/2007GL031389.
- Tanaka, H. K. M. et al. (2010) Three-dimensional computational axial tomography scan of a volcano with cosmic ray muon radiography. *J. Geophys. Res.*, **115**, B12332, doi: 10.1029/2010JB007677.
- 谷口宏充 (1996) 高温流紋岩質溶岩流—水接触型マグマ水蒸気爆発の発生機構. 地質学論集, **46**, 149–162.
- 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殻変動. 火山, **54**, 175–186.
- Terada, A., Hashimoto, T., Kagiya, T. and Sasaki, H. (2008) Precise remote-monitoring technique of water volume and temperature of a crater lake in Aso volcano, Japan: implications for a sensitive window of a volcanic hydrothermal system. *Earth Planets Space*, **60**, 705–710, doi: 10.1186/BF03353134.
- 津久井雅志・新堀賢志・川辺禎久・鈴木裕一 (2001) 三宅島火山の形成史. 地学雑, **110**, 156–167.
- 筒井智樹 (2005) 地震学的手法を用いた活火山構造探査の現状と課題. 火山, **50**, S101–S114.
- Tuffen, H., Smith, R. and Sammonds, P. R. (2008) Evidence for seismogenic fracture of silicic magma. *Nature*, **453**, 511–514, doi: 10.1038/nature06989.
- Turcotte, D. L., Ockendon, H., Ockendon, J. R. and Cowley, S. J. (1990) A mathematical model of Vulcanian eruptions. *Geophys. J. Int.*, **103**, 211–217.
- 宇井忠英・中川光弘・稲葉千秋・吉本充宏・総合観測班地質グループ (2002) 有珠山 2000 年噴火の推移. 火山, **47**, 105–117.
- Umakoshi, K., Takamura, N., Shinzato, N., Uchida, K., Matsuwo, N. and Shimizu, H. (2008) Seismicity associated with the 1991–1995 dome growth at Unzen volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **175**, 91–99, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2008.03.030.
- Umakoshi, K., Itasaka, N. and Shimizu, H. (2011) High-frequency earthquake swarm associated with the May 1991 dome extrusion at Unzen volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **206**, 70–79, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.07.004.
- Urai, M. and Ishizuka, Y. (2011) Advantages and challenges of space-borne remote sensing for Volcanic Explosivity

- Index (VEI): The 2009 eruption of Sarychev Peak on Matua Island, Kuril Island, Russia. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **208**, 163–168.
- Vergnolle, S. and Jaupart, C. (1986) Separated two-phase flow and basaltic eruptions. *J. Geophys. Res.*, **91**, 12842–12860.
- Vergnolle, S. and Jaupart, C. (1990) Dynamics of degassing at Kilauea volcano, Hawaii. *J. Geophys. Res.*, **95**, 2793–2809.
- Vergnolle, S. and Brandeis, G. (1994) Origin of the sound generated by Strombolian explosions. *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 1959–1962.
- Vergnolle, S. and Brandeis, G. (1996) Strombolian explosions 1. A large bubble breaking at the surface of a lava column as a source of sound. *J. Geophys. Res.*, **101**, 20433–20447, doi: 10.1029/96JB01178.
- Vergnolle, S., Brandeis, G. and Mareschal, J.C. (1996) Strombolian explosions 2. Eruption dynamics determined from acoustic measurements. *J. Geophys. Res.*, **101**, 20449–20466, doi: 10.1029/96JB01925.
- Voight, B. *et al.* (1999) Magma flow instability and cyclic activity at Soufriere Hills volcano, Montserrat, British West Indies. *Science*, **283**, 1138.
- Wadge, G. *et al.* (2008) Lava dome growth and mass wasting measured by a time series of ground-based radar and seismicity observations. *J. Geophys. Res.*, **113**, B08210, doi: 10.1029/2007JB005466.
- Waldhauser, F. and Ellsworth, W.L. (2000) A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **90**, 1353–1368, doi: 10.1785/0120000006.
- Walker, G.P.L. (1980) The Taupo pumice: Product of the most powerful known (ultraplinian) eruption? *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **8**, 69–94, doi: 10.1016/0377-0273 (80) 90008-6.
- Walter, T.R., Legrand, D., Granados, H.D., Reyes, G. and Arámbula, R. (2013a) Volcanic eruption monitoring by thermal image correlation: Pixel offsets show episodic dome growth of the Colima volcano. *J. Geophys. Res.*, **118**, 1408–1419, doi: 10.1002/jgrb.50066.
- Walter, T.R., Ratdomopurbo, A., Subandriyo, Aisyah, N., Brotopuspito, K.S., Salzer, J. and Lühr, B. (2013b) Dome growth and coulée spreading controlled by surface morphology, as determined by pixel offsets in photographs of the 2006 Merapi eruption. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **261**, 121–129, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2013.02.004.
- Wassermann, J. (1997) Locating the sources of volcanic explosions and volcanic tremor at Stromboli Volcano (Italy) using beam-forming on diffraction hyperboloids. *Phys. Earth Planet. Int.*, **104**, 271–281.
- Watada, S. and Kanamori, H. (2010) Acoustic resonant oscillations between the atmosphere and the solid earth during the 1991 Mt. Pinatubo eruption. *J. Geophys. Res.*, **111**, B12419, doi: 10.1029/2010JB007747.
- Widmer, R. and Zürn, W. (1992) Bichromatic excitation of long-period Rayleigh and air waves by the Mount Pinatubo and El Chichon volcanic eruptions. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 765–768.
- Wielandt, E. and Forbriger, T. (1999) Near-field seismic displacement and associated with the explosive activity of Stromboli. *Ann. Geofisica*, **42**, 407–416.
- Wilson, L. (1980) Relationships between pressure, volatile content and ejecta velocity in three types of volcanic explosion. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **8**, 297–313.
- Wilson, L. and Head, J.W. (1981) Ascent and eruption of basaltic magma on the Earth and Moon. *J. Geophys. Res.*, **86**, 2971–3001.
- Woods, A.W. and Kienle, J. (1994) The dynamics and thermodynamics of volcanic clouds: Theory and observations from the April 15 and April 21, 1990 eruptions of Redoubt volcano, Alaska. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **62**, 273–299, doi: 10.1016/0377-0273 (94) 90037-X.
- 八幡正弘 (2002) 有珠火山 2000 年噴火におけるマグマ水蒸気-水蒸気爆発による破砕深度とその時間的变化. 火山, **47**, 263–278.
- Yamamoto, M., Kawakatsu, H., Kaneshima, S., Mori, T., Tsutsui, T., Sudo, Y. and Morita, Y. (1999) Detection of a crack-like conduit beneath the active crater at Aso volcano, Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3677–3680, doi: 10.1029/1999GL005395.
- Yamamoto, M., Kawakatsu, H., Yomogida, K. and Koyama, J. (2002) Long-period (12 sec) volcanic tremor observed at Usu 2000 eruption: Seismological detection of a deep magma plumbing system. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 1329, doi: 10.1029/2001GL013996.
- 山本眞紀・他 (2005) 2004 年浅間山噴火に先行する特異な長周期地震活動. 火山, **50**, 393–400.
- 山里 平 (2005) 近代火山観測の歴史—気象庁の監視観測を中心に—. 火山, **50**, S7–S18.
- 山里 平・宮村淳一・森 博一・碓井勇二・佐久間喜代志・渡辺精久・佐藤十一・高橋悠治・坂井孝行 (2002) 空振データから見た 2000 年有珠山の噴火活動. 火山, **47**, 255–262.
- Yokoo, A. (2009) Continuous thermal monitoring of the 2008 eruptions at Showa crater of Sakurajima volcano, Japan. *Earth Planets Space*, **61**, 1345–1350.
- Yokoo, A. and Ishihara, K. (2007) Analysis of pressure waves observed in Sakurajima eruption movies. *Earth Planets Space*, **59**, 177–181.
- Yokoo, A. and Iguchi, M. (2010) Using infrasound waves from eruption video to explain ground deformation preceding the eruption of Suwanosejima volcano, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, **196**, 287–294, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2010.08.008.
- 横尾亮彦・宮縁育夫 (2015) 2014 年 11 月から始まった阿蘇火山中岳第一火口の噴火活動. 火山, **60**, 275–278.
- Yokoo, A., Tameguri, T. and Iguchi, M. (2009) Swelling-up of lava plug associated with Vulcanian eruption at Sakurajima volcano, Japan, as revealed by infrasound record—Case study on eruption on January 2, 2007—. *Bull. Volcanol.*, **71**, 619–630.
- 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., Suzuki, Y.J. and Iguchi, M. (2014) Dual infrasound sources from a Vulcanian eruption of Sakurajima volcano inferred from cross-array observation. *Seismol. Res. Lett.*, **85**, 1212–1222, doi: 10.1785/0220140047.
- 吉田邦一・笹谷 努・柳昌義・大島弘光・田村 慎 (2002) 2000 年有珠山噴火活動に伴う低周波地震. 火山, **47**, 507–519.
- 吉本充宏・他 (2005) 浅間山 2004 年噴火の噴出物の特徴と降灰量の見積もり. 火山, **50**, 519–533.
- Young, S. R., Sparks, R. S. J., Aspinall, W. P., Lynch, L. L., Miller, A. D., Robertson, R. E. A. and Shepherd, J. B. (1998) Overview of the eruption of Soufriere Hills volcano, Montserrat, 18 July 1995 to December 1997. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 3389–3392.
- Zobin, V. M., Navarro-Ochoa, C. J. and Reyes-Dávila, G. A. (2006a) Seismic quantification of the explosions that destroyed the dome of Volcán de Colima, Mexico, in July-August 2003. *Bull. Volcanol.*, **69**, 141–147, doi: 10.1007/s00445-006-0060-y.
- Zobin, V. M., Navarro, C., Reyes-Dávila, G., Orozco, J., Bretón, M., Tellez, A., Reyes-Alfaro, G. and Vázquez, H. (2006b) The methodology of quantification of volcanic explosions from broad-band seismic signals and its application to the 2004–2005 explosions at Volcán de Colima, Mexico. *Geophys. J. Int.*, **167**, 467–478, doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.03108.x.s
- Zobin, V. M., Reyes, G. A., Guevara, E. and Bretón, M. (2009) Scaling relationship for Vulcanian explosions derived from broadband seismic signals. *J. Geophys. Res.*, **114**, B03203, doi: 10.1029/2008JB005983.
- Zobin, V. M., Bretón, M. and Navarro, C. (2014) Similarity in seismic source scaling relations for tectonic and volcanic processes. *Phys. Earth Planet. Int.*, **231**, 65–73, doi: 10.1016/j.pepi.2014.03.007.

(編集担当 青木陽介)