

## 降下火砕堆積物の粒子サイズ分布の層序変化と噴煙時間変化の数学的関係性の導出 The mathematical link between stratigraphic grain size variation of fall deposits and its time variation at the source

入山 宙<sup>1\*</sup>; 寅丸 敦志<sup>2</sup>; 山本 哲生<sup>3</sup>  
IRIYAMA, Yu<sup>1\*</sup>; TORAMARU, Atsushi<sup>2</sup>; YAMAMOTO, Tetsuo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院理学府地球惑星科学専攻, <sup>2</sup>九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門, <sup>3</sup>神戸大学惑星科学研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Graduate School of Sciences, Kyushu University, <sup>2</sup>Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Sciences, Kyushu University, <sup>3</sup>Center for Planetary Science, Kobe University

Pyroclastic fall deposits which are produced by explosive volcanic eruption have various information on the eruption events. The areal distributions of pyroclastic fall deposits such as maximum grain size, median grain size, thickness, mass per unit area, etc. reflect the intensity in a single eruption and the wind conditions. Stratigraphic grain size variations of pyroclastic fall deposits also reflect the temporal behavior of the eruption intensity. For example, normal or reverse grading structures in the pyroclastic fall deposits have been attributed to temporal variation in the volcanic intensity (column height) and/or in the initial grain size distribution at the vent. However, no quantitative methodology has been developed to relate the temporal variation of source characteristics (column height and initial grain size distribution) to stratigraphic variation of grain size distribution at the deposits. In this study, we consider the mathematical description in 1D fall-sedimentation process, which relates the temporal variation of source grain size distribution to stratigraphic variation of grain size distribution.

The number of grains in a size bin must be conserved during sedimentation process and results in the same value at the arrival time on the deposits. The number of a specific-size grains between at the fallout time and at given times is linked by Lagrangian description. The key point is that the grain size and the departure time at the source are mutually related to the grain size and the arrival time at the deposits. As the arrival time corresponds to the stratigraphic location at the deposit, the stratigraphic variation of grain size in the deposit can be connected to the grain size characteristics and departure time at the source using the condition of grain number conservation. As a result, when the time variations of source grain size distribution and of fallout height are given, we obtain the temporal variation of grain size distribution at the sedimentation surface. It means that different sizes of grains which settle at the same arrival time are traced back to the different source time and height. The arrival time on the deposit can be related to the stratigraphic height in the deposit by the differential equation of increasing rate of the thickness, which equals to the volume flux through the sedimentation surface. By using these mathematical descriptions, we develop the mathematical method to link the temporal variation of eruption intensity to the stratigraphic variation of grain size distribution in the fall deposits.

キーワード: 降下火砕堆積物, 粒子サイズ分布, 層序変化, 噴火推移

Keywords: pyroclastic fall deposits, grain size distribution, stratigraphic variation, development of eruption

## 桜島火山昭和火口噴火における火山灰色と粒径の連続観測 Color and grainsize of ash samples collected continuously at Sakurajima volcano, Japan

嶋野 岳人<sup>1\*</sup>; 西村 太志<sup>2</sup>; 井口 正人<sup>3</sup>; 味喜 大介<sup>3</sup>  
SHIMANO, Taketo<sup>1\*</sup>; NISHIMURA, Takeshi<sup>2</sup>; IGUCHI, Masato<sup>3</sup>; MIKI, Daisuke<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 常葉大学大学院環境防災研究科, <sup>2</sup> 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, <sup>3</sup> 京都大学防災研究所火山活動研究センター

<sup>1</sup>Graduate school of Environment and Disaster Research, Tokoha University, <sup>2</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>3</sup>Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

桜島火山は50年以上活動を続ける我が国有数の活火山であるだけでなく、これまでに構築・蓄積されてきた地球物理学的な連続観測網とデータから、年単位にわたるマグマ上昇から数時間単位で発生する爆発現象の素過程に至るまで、比較的理解の進んだ火山である。一方で、本火山の噴火史上では、しばしばプリニー式噴火を含む極めて大規模かつ爆発的な噴火が発生しているおり、今日の連続的活動との関係や移行過程についてはほとんど理解が進んでいない。また、いわゆる「ブルカノ式噴火」に代表される最近の活動についても、さまざまな噴火タイプの存在が比較的多くの研究者に認識されつつある一方で、これらの差異がどのような素過程に起因するのかについては、あまり良く分かっていない。これらの現象は、特に数ヶ月～数日単位の変動として特徴付けられるため、本研究では噴出物の連続採取を行って、この期間のマグマ上昇過程や噴火様式の遷移過程について明らかにすることを目指している。

これまでわれわれは自動火山灰採取装置を開発し、桜島火山昭和火口から約2kmの地点で連続採取に成功した(Shimano et al., 2013)。この間、火山灰粒子の石基ガラス組成を連続的に分析した結果、2009年秋の活動活発化に先立って、それ以前と異なる組成のマグマの出現を検出した。一方、地球物理学的観測データと比較検討するためには、リアルタイムデータの取得が久しく望まれてきた。また、近年、分光測色計の汎用化および火山灰の加熱実験により(宮城東宮, 2002; Yamanoi et al., 2008 など)、火山灰の色と温度条件などの関係が明らかになりつつある。本研究では、今後、リアルタイム観測につなげるべく、桜島において連続採取した火山灰試料の分光測色計による色測定を行った。また、火山灰については、粒径毎に色が異なることが指摘されているため(宮城ほか, 2010)、粒径毎に測色を行って色と粒径の関係について考察した。

キーワード: 火山灰, 連続観測, 色変化, 桜島火山

Keywords: volcanic ash, continuous observation, color change, Sakurajima volcano

## 2011年1月26 - 27日新燃岳噴火に伴う火山灰輸送に関する数値実験 Numerical Simulation of Volcanic Ash Transport for the Eruptions at Mt. Shinmoe-dake during 26-27 January 2011

橋本 明弘<sup>1\*</sup>; 鈴木 雄治郎<sup>2</sup>; 新堀 敏基<sup>1</sup>; 高木 朗充<sup>1</sup>  
HASHIMOTO, Akihiro<sup>1\*</sup>; SUZUKI, Yujiro<sup>2</sup>; SHIMBORI, Toshiki<sup>1</sup>; TAKAGI, Akimichi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 気象庁気象研究所, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup> Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency, <sup>2</sup> Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

2011年1月26-27日新燃岳噴火による火山灰輸送を、気象庁非静力学モデルをベースとする噴煙-降灰モデルを用いて再現し、衛星観測データによる検証を行っている。噴煙-降灰モデルは、火山灰の粒子サイズ・放出地点を初期条件として与えることで大気中への火山灰放出を表し、単位質量空気に含まれる火山灰粒子の質量と数を予報変数として火山灰雲の移流・拡散を再現する。計算領域は宮崎県沖から四国沖を中心として2500km × 2000kmと広域にとり、水平解像度は5kmとした。

火山灰放出は、単純な鉛直一次元噴煙柱モデル (Suzuki, 1983; Shimbori et al., 2010) に基づき、噴煙頂高度・火山灰粒子のサイズ・放出点高度の関数として与える。数値実験の結果、衛星で観測された火山灰雲の大局的な分布は再現できたものの、詳細を見ると火山灰雲の有無が観測データと異なる領域がみとめられ、仮定した火山灰放出点やサイズ分布に改善の余地があることが分かった。そこで、より現実的な火山灰放出を初期条件として与えるために、噴煙ダイナミクスを考慮した3次元直接数値計算を行った (Suzuki and Koyaguchi, 2013)。3次元直接数値計算の結果、従来の鉛直一次元噴煙柱モデルから与えられる火山灰放出の関数に比べ、数10 $\mu$ m未満の火山灰粒子の放出率のピークがより低い高度に現れることが新たに分かった。この結果から推定される火山灰放出の関数を導入して、新たな噴煙柱モデルを開発している。広域火山灰輸送に対する新しい火山灰放出の関数の効用について、数値実験の結果を示し議論する。

### 謝辞

本研究は、東京大学地震研究所共同研究プログラムの援助をうけました。

### 参考文献

- Shimbori, T., Y. Aikawa, K. Fukui, A. Hashimoto, N. Seino, and H. Yamasato, 2010: Quantitative tephra fall prediction with the JMA mesoscale tracer transport model for volcanic ash: A case study of the eruption at Asama volcano in 2009. *Pap. Met. Geophys.*, **61**, 13-29.
- Suzuki, T., 1983: A theoretical model for dispersion of tephra. *Arc Volcanism: Physics and Tectonics*. TERRAPUB, 95-113.
- Suzuki, Y. and T. Koyaguchi, 2013: 3D numerical simulation of volcanic eruption clouds during the 2011 Shinmoe-dake eruptions. *Earth Planets Space*, **65**, 581-589.

キーワード: 火山灰拡散, 移流拡散モデル, 新燃岳, 2011年

Keywords: volcanic-ash dispersal, Atmospheric Transport Model, Shinmoe-dake volcano, 2011

## 気象レーダによる噴煙の実態解明と火山防災 Weather Radar Investigation of Volcanic Smoke for Disaster-Prevention

真木 雅之<sup>1\*</sup>; 井口 正人<sup>2</sup>; 藤田 英輔<sup>3</sup>; 前坂 剛<sup>3</sup>; 出世 ゆかり<sup>4</sup>; 小園 誠史<sup>4</sup>; 桃谷 辰也<sup>5</sup>; 山路 昭彦<sup>5</sup>  
MAKI, Masayuki<sup>1\*</sup>; IGUCHI, Masato<sup>2</sup>; FUJITA, Eisuke<sup>3</sup>; MAESAKA, Takeshi<sup>3</sup>; SHUSSE, Yukari<sup>4</sup>; KOZONO, Tomofumi<sup>4</sup>  
; MOMOTANI, Tatsuya<sup>5</sup>; YAMAJI, Akihiko<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 鹿児島大学, <sup>2</sup> 京都大学防災研究所, <sup>3</sup> 防災科学技術研究所, <sup>4</sup> 東北大学, <sup>5</sup> 日本気象協会

<sup>1</sup>Kagoshima University, <sup>2</sup>DPRI, Kyoto University, <sup>3</sup>NIED, <sup>4</sup>Tohoku University, <sup>5</sup>Japan Weather Association

桜島は、2009年2月以降、爆発的噴火が急増しており、2011年には観測史上最多の966回を記録した。噴火の急増に合わせて、鹿児島市内の降灰量も急増しており、2012年は鹿児島地方気象台における降灰量が3,500g/m<sup>2</sup>を超えた。鹿児島市街地に降る大量の火山灰（ドカ灰）は、鉄道や道路等の交通機関を麻痺させるなど大きな影響を与えるため、早期の復旧作業が必要となる。噴火後、迅速に復旧作業を進める際、降灰量や火山灰が降り積もった範囲を把握することが重要となるが、現在、リアルタイムに降灰分布を把握手段がない。そこで本研究により、通年稼働している気象レーダを用いたリアルタイム降灰量分布の推定手法の開発や降灰予測の高度化を検討する。本研究の成果は、国内外にかかわらず、気象レーダの観測範囲内に位置する活火山への適用が可能である。

キーワード: 気象レーダ, 火山灰, 定量的推定式, 桜島, 偏波レーダ

Keywords: weather radar, volcanic ash, quantitative ash estimation, Sakurajima, polarimetric radar



## 噴火のタイプは上昇するマグマの流量と揮発性成分量で決まる Eruption types determined by the mass flux and volatile component content of ascending magma flow

井田 喜明<sup>1\*</sup>; 及川 純<sup>2</sup>  
IDA, Yoshiaki<sup>1\*</sup>; OIKAWA, Jun<sup>2</sup>

<sup>1</sup> アドバンスソフト株式会社, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所  
<sup>1</sup> Advance Soft Co., <sup>2</sup> Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo

噴火にはマグマが液体状態を保って流出する非爆発的な噴火とマグマが破碎されて噴霧流などの形で噴出する爆発的な噴火がある。伝統的な区分では、爆発的な噴火はさらに定期的に噴煙を高く上げるプリニー式噴火、火砕流をふんだんに出し出すプレー式噴火、瞬発的な強い爆発を伴うブルカノ式噴火、間欠的に噴泉を上げるストロンボリ式噴火などに分類される。爆発的な噴火と非爆発的な噴火の違いが脱ガス量に支配されることはよく知られているが、爆発的な噴火のタイプがどう決まるかは必ずしも明快に説明されていない。本発表では、爆発的な噴火のタイプが深部のマグマ上昇流の性質にどう依存するのかを、定常火道モデルに基づく単純なモデルで説明する。

マグマが地表に噴出するときの状態は、噴出時のマグマの流速と発泡度で表わせるが、発泡度はそれを決める揮発性成分量で代用できる。揮発性成分量は液体マグマ（結晶も含むマグマの液体部分）に対する質量比で表す。一方、深部のマグマの状態は液体マグマの流量（質量流量）と脱ガスが始まる前の揮発性成分量で表現するのが便利である。マグマ上昇流が定常状態にあるときには、液体マグマの流量は深さによらず一定になるので、このふたつの量はマグマが上昇を開始する深さに依存せずに深部の状態を表現できる。

地表の状態と深部の状態は定常火道流モデルを用いて結びつける。この計算で、揮発性成分は鉛直方向には相対運動を無視して液体マグマと同じ速度で上昇するものとする。気泡流の状態では、気化した揮発性成分がマグマ中を浸透流によって水平方向に移動する効果を考え、それが脱ガスを律速するものとする。マグマの上昇速度は中心ほど大きいため、減圧に伴う膨張の緩和に差ができて水平方向に圧力勾配が生じ、それが浸透流を駆動すると考えるのである (Ida, JVGR, 162, 172-184, 2007)。壁からマグマが受ける摩擦抵抗は、気泡流の状態では上昇速度に、噴霧流の状態では上昇速度の2乗に比例するとして、それぞれの抵抗係数を求める。揮発性成分の溶解度には水蒸気に対する関係を用いる。

火道流の積分は地表から地下に向かって実行する。地表の圧力を1気圧とし、噴出時の流速と揮発性成分量に様々な組み合わせを与えて、対応する地下深部での液体マグマの流量と揮発性成分量を計算するのである。計算結果を整理してみると、地下深部の条件と地表の噴出状態の関係は、その特徴によっていくつかのグループに分けられた。グループの各々が噴火タイプと対応づけられて以下のように解釈できるのである。

地下深部の揮発性成分量が十分に多いときは、地表からは高速の噴霧流が激しく噴出する。これが第1のグループで、プリニー式噴火と対応づけられる。噴出時の流速や揮発性成分量は、上昇途上の脱ガスによって調整されて、地下深部の揮発性成分量に依存せずに液体マグマの流量だけで決まる。揮発性成分量の多い状態で液体マグマの流量を下げていくと、あるしきい値以下で火道流の定常解が存在しなくなる。これが第2のグループで、この条件下では噴火は非定常になり、ブルカノ式やストロンボリ式噴火になるものと解釈できる。第3に、地下の揮発性成分量が少ないときには、発泡状態の悪いマグマが遅い速度で噴出する。この状態では噴出後に流速を加速するのは難しく、噴火は噴霧流が火砕流として流下するプレー式噴火になると解釈できる。

以上の解析と解釈によれば、様々な噴火タイプは液体マグマの上昇流量と脱ガス効率の兼ね合いで生まれる。噴火タイプが特徴的な性質をもつグループに分かれるのは、発泡や脱ガスを含むマグマ上昇流が強い非線形性をもつためである。

キーワード: 噴火タイプ, マグマ上昇流, 火道流モデル, 揮発性成分量, 脱ガス, 数値シミュレーション

Keywords: volcanic eruption type, ascending magma flow, conduit flow model, volatile component content, degassing, computer simulation

## 噴出率・噴火様式とマグマ溜まり粘性との関係 Magma eruption rates, eruption styles, and preeruptive magma viscosity

東宮 昭彦<sup>1\*</sup>; 小屋口 剛博<sup>2</sup>; 小園 誠史<sup>3</sup>; 竹内 晋吾<sup>4</sup>  
TOMIYA, Akihiko<sup>1\*</sup>; KOYAGUCHI, Takehiro<sup>2</sup>; KOZONO, Tomofumi<sup>3</sup>; TAKEUCHI, Shingo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>産総研・地質調査総合センター, <sup>2</sup>東京大学・地震研究所, <sup>3</sup>東北大学・大学院理学研究科・地球物理学専攻, <sup>4</sup>一般財団法人・電力中央研究所・地球工学研究所

<sup>1</sup>Geological Survey of Japan, AIST, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo, <sup>3</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>4</sup>Civil Engineering Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry

マグマ噴出率は、噴火ダイナミクスを理解するために最も基本的な観測量の1つである。多くの場合に地質学的・地球物理学的データから得られるこの量を、岩石学的データ、および火道内のマグマの流体力学と結びつけて議論することを試みる。

まず、さまざまな噴火様式（プリニー式、準プリニー式、玄武岩質プリニー式、溶岩流、溶岩ドーム）ごとに、噴出率・全岩化学組成・斑晶量を計100組あまりコンパイルした。そしてこれを、「マグマ溜まり粘性」(preeruptive magma viscosity; Takeuchi, 2011) に着目して整理した。マグマ溜まり粘性とは、マグマ溜まりにおけるマグマ（メルト+結晶）の粘性であり、マグマの噴火能力 (eruptibility) の重要な指標である。マグマ溜まり条件（温度・含水量）におけるメルト組成と斑晶量から計算される。ここでは、メルト組成を全岩組成と斑晶量から簡便に算出する方法（竹内, 2010）を用いた。得られたマグマ溜まり粘性と噴出率・噴火様式の間関係をみると、噴火様式はマグマ溜まり粘性と相関する一方、全岩化学組成とはあまり相関しなかった。

次に、爆発的噴火 (e.g., プリニー式) と溢流的噴火 (e.g., 溶岩ドーム) との間遷移 (e.g., Kozono and Koyaguchi, 2009a,b) を理解するため、同一噴火内における爆発的フェーズと溢流的フェーズの噴出率をピックアップし、マグマ溜まり粘性との関係を調べた。その結果、マグマ溜まり粘性が高いほど、両フェーズの噴出率のギャップ（噴出率比）も大きいことが分かった。これは、爆発的噴火と溢流的噴火の遷移条件がマグマ溜まり粘性に制約されていることを示唆する。

以上の結果は、噴火様式や噴出率を、マグマ溜まり粘性（マグマ溜まり条件）が大きく支配していることを示している。特に、マグマ溜まり粘性が  $10^4$  Pa s 付近を境に、2つのタイプに分けられそうである。(1) 低粘性タイプ（玄武岩～低斑晶量安山岩）：爆発的噴火は玄武岩質プリニー式～準プリニー式、溢流的噴火は溶岩流が多く、両噴火の噴出率のギャップは小さい；伊豆大島1986年噴火、ヘクラ1947・1970・1980・1991年噴火、新燃岳2011年噴火、など。(2) 高粘性タイプ（高斑晶量安山岩～流紋岩）：爆発的噴火はプリニー式（あるいは準プリニー式の連発）、溢流的噴火は溶岩ドーム・潜在ドームが多く、両噴火の噴出率のギャップは大きい；全岩  $\text{SiO}_2$  と斑晶量に負の相関が見られる；ピナツボ1991年噴火、セントヘレンズ1980-86年噴火、有珠1977-78年噴火、など。2つのタイプは、各マグマの生成・蓄積過程 (e.g., 結晶分化, マッシュ状マグマ溜まりからのメルト分離) を反映している可能性がある。

キーワード: マグマ噴出率, 噴火様式, マグマ溜まり粘性, 爆発的噴火-溢流的噴火の遷移, 斑晶量, 全岩化学組成

Keywords: magma eruption rates, eruption styles, preeruptive magma viscosity, transition between explosive and effusive eruption, phenocryst content, bulk rock chemical composition

## 溶岩ドームから爆発的噴火への遷移条件 Conditions for transition from lava dome to explosive eruption

小園 誠史<sup>1\*</sup>; 小屋口 剛博<sup>2</sup>  
KOZONO, Tomofumi<sup>1\*</sup>; KOYAGUCHI, Takehiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Department of Geophysics, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

マグマの発泡やガスの分離(脱ガス), 結晶化を伴う溶岩ドーム噴火における火道流のダイナミクスは, 爆発的噴火への遷移などの複雑な噴火プロセスをもたらす。溶岩ドームから爆発的噴火への遷移は, 急激な噴火強度の増加を伴うため, その遷移が生じる条件を明らかにすることは火山防災にとっても重要な意義がある。本研究では, 一次元火道流モデルに基づき, 溶岩ドームから爆発的噴火への遷移条件がマグマ物性や地質条件に依存してどのように変化するかを調べた。

噴火遷移条件のマグマ物性・地質条件への依存性を系統的に調べるために, 本研究では定常火道流におけるマグマ溜まり圧力( $p_{ch}$ )とマグマ噴出率( $q$ )の関係( $p_{ch}$ - $q$ カーブ)を用いた。 $p_{ch}$ - $q$ カーブの傾き( $dp_{ch}/dq$ )が正の場合, 定常流は安定になる一方で,  $dp_{ch}/dq$ が負, つまり火道流が負性抵抗をもつ場合, 定常流は不安定になる。この負性抵抗は2つの正のフィードバックメカニズムによってもたらされる, 第一に, 結晶化の遅れの効果による, マグマ噴出率の増加に伴うマグマの実効粘性の減少が, 火道壁からの粘性抵抗の減少をもたらす(フィードバック1)。第二に, 脱ガスの非効率化の効果による, 噴出率の増加に伴うマグマ発泡度の増加が, マグマの荷重による抵抗の減少をもたらす(フィードバック2)。これら二つのフィードバックの効果によって, 低噴出率と高噴出率の領域で  $dp_{ch}/dq > 0$  となり, その間の中間領域で  $dp_{ch}/dq < 0$  となり負性抵抗をもつS字型の  $p_{ch}$ - $q$ カーブがある現実的な条件で出現する。時間発展火道流モデルの解析によると, このS字型の  $p_{ch}$ - $q$ カーブのために, 深部からのマグマ供給率が低噴出率の領域から中間領域まで徐々に増加していった場合, 低噴出率から高噴出率の領域へ火道流が急激に遷移することがわかった。この噴出率の急増を伴う遷移は, 安定な溶岩ドームから爆発的噴火への遷移過程として捉えることができる。そこで本研究では, 低噴出率の領域と中間領域の境界における  $q$  の値を, 噴火遷移が生じる重要な臨界値( $q_{cr}$ )として定義した。

解析の結果,  $q_{cr}$  は幅広いパラメータ条件のもとでフィードバック2によって支配され, 斑晶量が非常に高い場合にのみフィードバック1によって支配されることがわかった。 $q_{cr}$  がフィードバック2によって支配される場合, その値は縦方向や横方向への脱ガス浸透率などの脱ガスに関連するパラメータに依存する。本研究では, 縦方向脱ガス浸透率の範囲を噴出物の浸透率測定データから制約した場合に,  $q_{cr}$  が横方向脱ガス浸透率の減少とともに急激に減少し, その浸透率が0(横方向脱ガスなし)の極限では典型的な溶岩ドーム噴火の噴出率の観測値よりはるかに低くなることを明らかにした。このことは, 横方向脱ガスが安定な溶岩ドーム噴火の出現に本質的な役割を果たしていることを示している。さらに  $q_{cr}$  の値は, 火道径に強く依存することがわかった。これは, 火道径の変化が脱ガスの割合に大きな影響を与えるためである。火道径が減少すると, 火道壁からの粘性抵抗が増加することで液相の上昇が抑制され, その結果縦方向脱ガスが促進される。また火道径の減少は, 火道断面積/火道周の比の増加や, 横方向ガス浸透流を駆動する圧力勾配の長さスケールの減少をもたらす, これによって横方向脱ガスが促進される。これらの脱ガス促進によって溶岩ドーム噴火がより安定化し, すなわち  $q_{cr}$  が増加する。このことは, 火道径の変化が噴火の遷移過程に関連する重要なプロセスであることを示唆している。

キーワード: 火道流, 数値モデル, 噴火遷移, 溶岩ドーム, 爆発的噴火, 脱ガス

Keywords: conduit flow, numerical model, eruption transition, lava dome, explosive eruption, gas escape



## 爆発地震の解析から示唆されるフィリピン・マヨン火山の水蒸気爆発モデル A phreatic explosion model for Mayon volcano, Philippines, inferred from analyses of an explosion earthquake

前田 裕太<sup>1\*</sup>; 熊谷 博之<sup>1</sup>; Lacson Rudy<sup>2</sup>; Figueroa Melquiades<sup>2</sup>; 山品 匡史<sup>3</sup>; 大倉 敬宏<sup>4</sup>; Bornas Antonia<sup>2</sup>  
MAEDA, Yuta<sup>1\*</sup>; KUMAGAI, Hiroyuki<sup>1</sup>; LACSON, Rudy<sup>2</sup>; FIGUEROA, Melquiades<sup>2</sup>; YAMASHINA, Tadashi<sup>3</sup>; OHKURA,  
Takahiro<sup>4</sup>; BORNAS, Antonia<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 名古屋大学, <sup>2</sup>PHIVOLCS, <sup>3</sup> 高知大学, <sup>4</sup> 京都大学

<sup>1</sup>Nagoya University, <sup>2</sup>PHIVOLCS, <sup>3</sup>Kochi University, <sup>4</sup>Kyoto University

マヨン火山はフィリピンで最も活発な活火山の一つであり 1616 年から 2010 年までに計 49 回の噴火を繰り返してきた。このマヨン火山において 2013 年 5 月 7 日に水蒸気爆発が発生、5 人の登山者が犠牲となった。本講演では波形インバージョンにより水蒸気爆発時の地震波を解析し、その結果をもとに同火山における水蒸気爆発の発生モデルに関して考察を行ったのでそれについて報告する。

我々は 2011 年より同火山に広帯域地震計 3 観測点を設置して連続観測を行ってきた。この観測網によって 2013 年爆発時に卓越周期 0.4 Hz の VLP イベントが記録された。同イベントの波形に 0.1-0.6 Hz のバンドパスフィルターを掛け、周波数領域で波形インバージョンを行ったところ、火口直下近傍浅部における水平な開口クラックと鉛直なシングルフォースの組合せの解が得られた。クラックとシングルフォースからの波形への寄与の振幅は同程度であった。

波形インバージョンで得られた震源時間関数はバンドパスフィルターの掛かったもの (filtered source time function; FSTF) であるので、フィルターの掛かっていない本来の震源時間関数 (deconvolved form of source time function; DSTF) とは形状が大きく異なる可能性がある。DSTF の推定のためには FSTF からバンドパスフィルターをデコンボリューションする必要があるが、数値的に安定にこれを行うのは容易ではない。そこで DSTF の候補として単純な関数形である有限な時間幅を持ったステップ型・インパルス型の関数を考え、これらにバンドパスフィルターを掛けたものを FSTF と比較したところ、インパルス型を用いた場合に FSTF に比較的近い波形が得られた。このことは DSTF がインパルス型の関数で近似できることを示している。開口クラックに対する DSTF は膨張とそれに引き続き収縮を示し、シングルフォースに対する DSTF はクラックの開口量最大となる時刻近傍での下向きの力を示す。

爆発の前兆現象探索のため、地震波の連続記録における RMS 振幅、山体を挟む GPS 基線長、山頂の高温域の地表面温度、観測点間の地震波波形相関、二酸化硫黄放出量、降雨量の時間変化を調べたが、いずれにおいても爆発前に明瞭な前兆現象は見つからなかった。

以上の結果をもとに考察を行う。解析した VLP イベントは水蒸気爆発時のものである。クラックの DSTF の前半部分に見られる膨張はクラック内の地下水の沸騰によるものと解釈できる。浅部の水平なクラック解が得られたことと合わせて考えると、透水層と不透水層の境界が弱面となってクラックが生成、そこに地下水が蓄積・沸騰して水蒸気爆発に至ったというモデルを考えることができる。一方、DSTF の後半に見られる下向きのシングルフォースは爆発の反力、クラックの収縮は爆発時の水蒸気放出によるものと理解できる。

モーメント振幅は 400 m×400 m のクラックが 0.4 m の厚さの膨張・収縮をしたと考えることで説明がつくが、これに相当する規模の山頂近傍の地形変化は観測されていない。したがって爆発の領域は限定的でクラックの大部分は爆発によって破碎されなかったものと思われる。このようなクラックにおいて繰り返し爆発が発生する可能性について検討する。爆発の直後にはクラックの一部が破碎された状態にあるために水蒸気を保持することができない。しかしながら熱水変質の進行に伴って爆発で破碎された部分の浸透率が徐々に低下すればクラックはやがて密閉構造となって次の爆発を起こしうる。マヨン火山では 2003, 2004, 2006, 2009 年に火山灰を放出する小規模な爆発が発生しており、これらが今回の爆発と同じクラックによって発生したとすると爆発の間隔は数日~数年 (多くは 1 ヶ月以上) となる。一方、マヨン火山の過去のマグマ噴火の噴出物に類似の組成を持つ玄武岩を用いた熱水変質の室内実験 (Berger et al., 1994, *Geochim. Cosmo. Acta*) から、センチメートルオーダーの隙間が熱水変質鉱物の沈殿によって閉塞されるのに要する時間は 300 °C の環境下で 2 ヶ月、150 °C の環境下で 4 年 6 ヶ月と推定でき、上記の爆発の間隔と近い値になる。

このモデルでは水蒸気爆発の発生時期は密閉構造の形成によって規定されるので、ガス・熱・地下水の定常的な供給があればその供給レートが変化しなくても水蒸気爆発を起こしうる。このことは今回の爆発前に明瞭な前兆現象が観測されなかったことと整合的である。またマヨン火山では 2011 年の観測開始以来、今回の水蒸気爆発時を除いて VLP イベントは観測されていないが、このことも爆発の直前に密閉構造が完成したと考えれば説明がつく。

キーワード: 水蒸気爆発, 波形インバージョン, 震源時間関数, 熱水変質

Keywords: Phreatic explosion, Waveform inversion, Source time function, Hydrothermal alteration



## 深部低周波地震, 山体変動, 地中 CO<sub>2</sub> 濃度変化の関連からみた伊豆大島火山の噴火準備過程の特徴 Magma accumulation process of Izu-Oshima volcano, as revealed from deep LF earthquakes, deformation and CO<sub>2</sub> out-gassing

渡辺 秀文<sup>1\*</sup>  
WATANABE, Hidefumi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 東京都総合防災部  
<sup>1</sup> Disaster Prevention Division, Tokyo Metropolitan Government

噴火の中期予測のためには、深部からのマグマ供給・蓄積過程を把握するだけでなく、噴火に至る過程の理解（特に、マグマ溜り内の揮発成分濃度や気泡存在度の変化、噴火へ向けてのマグマ再上昇開始の条件など）が重要である。本講演では、伊豆大島火山 1986 年噴火後の長期的な山体膨張変動、深部低周波地震活動および山頂地中 CO<sub>2</sub> ガス濃度変化の関連からみた、噴火準備過程の特徴について報告する。

**1986 年噴火後の山体膨張の特徴：**1989 年後半に伊豆大島火山の山体膨張が再開したが、伊豆大島において最も高感度で長期間連続観測されている気象庁旧大島測候所の体積歪計データを再解析した結果、いくつかの注目すべき特徴が明らかになっている。(1) 経年的な山体膨張は 2006 年頃までは指数減衰曲線で非常に良く近似できるが、2007 年以降はそのトレンドから外れて大きくなっている。(2) 経年的な膨張に重畳して、1-2 年間隔で収縮-膨張変動が繰り返し発生し、1993-2011 年に収縮-膨張サイクルが 10 回発生しているが、殆どの場合に収縮から始まり、途中で急速に反転膨張するという特徴がある。(3) 変動の振幅と継続時間が 1999 年頃以降増大している（最大約 2  $\mu$  strain）。このような収縮-膨張変動は 1986 年噴火前にも観測されており、最大振幅は約 5  $\mu$  strain であった（渡辺, 2008 年連合大会）。

**深部低周波地震活動と山体変動の関連：**2001-2011 年の期間の気象庁一元化処理震源によると、大島直下深さ 30-40km の上部マントルに発生する深部低周波地震の発生回数が 2007 年以降増大しており、それに約 1.5 ヶ月遅れて山体周辺の地震回数が増加している。また、2010 年の膨張イベントに際しても同様な時間的な関連が認められる。従って、2007 年以降の山体膨張速度の増大は、上部マントルからのマグマ供給率の増大によるものと考えられる。さらに、体積歪変化と深部低周波地震の発生回数との関係を調べると、2007 年および 2010 年の両イベントとも、山体収縮が先行し、その後の反転膨張と深部低周波地震の発生回数増加がほぼ同期していることが分かった。

**山体収縮-膨張サイクルの概念モデル：**これらの観測事実を総合すると、収縮-膨張サイクルを説明する以下の概念モデルが得られる。(1) 浅部マグマ溜り上部に濃縮した CO<sub>2</sub> に富む気泡が間欠的に外部へ流出することにより減圧し、(2) その結果生じる深部マグマ溜りとの圧力差の変化により、深部から浅部へ向けて揮発性分に富むマグマの上昇が起こり、(3) 浅部マグマ溜りへ上昇したマグマの発泡により浅部マグマ溜りの増圧が起こる。

**山体変動と CO<sub>2</sub> 地中濃度の関連：**浅部マグマ溜りからのガス流出が山体収縮-膨張サイクルをトリガーするという仮説を実証するためには、山体変動と山頂火口周辺での CO<sub>2</sub> ガス放出量変化との関連を調べるのが重要である。2005 年以来、山頂火口近傍で地中 CO<sub>2</sub> ガス濃度の連続観測を継続し、山体膨張の加速に引き続いて地中 CO<sub>2</sub> 濃度が上昇するのみならず、収縮時期にも CO<sub>2</sub> 濃度が増加することが分かった。このことは、山体収縮がマグマからのガス放出によることを示唆する。

**伊豆大島火山の噴火中期予測の指標：**このモデルが正しければ、1999 年以降に観測されている収縮-膨張変動の振幅増大は、浅部マグマ溜り上部の気泡に富んだ領域の体積増加を示唆し、噴火準備過程の進行を示す指標と考えられる。例えば、最近の収縮-膨張変動振幅の増加傾向をそのまま外挿すると、1986 年噴火前の最大振幅約 5  $\mu$  strain に達するのは約 10 年後となる。

キーワード: 伊豆大島火山, 噴火予測, 噴火準備過程, 山体膨張, CO<sub>2</sub> 脱ガス

Keywords: Izu Oshima volcano, eruption prediction, precursors to eruption, volcano deformation, CO<sub>2</sub> out-gassing

## 2011年霧島火山の噴火に伴って発生した火山性微動の時空間的特徴 Spatio-temporal characteristics of volcanic tremor during the 2011 Kirishima eruption by seismic wave analysis

中元 真美<sup>1\*</sup>; 松本 聡<sup>1</sup>; 山中 佳子<sup>2</sup>; 清水 洋<sup>1</sup>; 中道 治久<sup>4</sup>; 市原 美恵<sup>3</sup>; 及川 純<sup>3</sup>

NAKAMOTO, Manami<sup>1\*</sup>; MATSUMOTO, Satoshi<sup>1</sup>; YAMANAKA, Yoshiko<sup>2</sup>; SHIMIZU, Hiroshi<sup>1</sup>; NAKAMICHI, Haruhisa<sup>4</sup>; ICHIHARA, Mie<sup>3</sup>; OIKAWA, Jun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 九大・地震火山センター, <sup>2</sup> 名大火山研究センター, <sup>3</sup> 東大・地震研, <sup>4</sup> 京都大学防災研究所

<sup>1</sup> SEVO, Kyushu Univ., <sup>2</sup> EVRC, Nagoya Univ., <sup>3</sup> ERI, University of Tokyo, <sup>4</sup> DPRI, Kyoto Univ.

火山性微動はマグマだまりから火口に至る浅部のマグマ供給系において発生すると考えられている震動であり, これらはマグマの存在位置や火道の状態を推定するうえで重要な情報を含んでいる. したがって, 発生源の位置, 震動特性を把握することがマグマ供給系のモデル化, 活動の状態, 推移を考える上で極めて重要である. そこで本研究ではこれらのモデル化を目指し, 地震学的な観測データを用いて微動の特性についての把握を試みた. 2011年1月から開始した霧島山・新燃岳の噴火では, 噴火活動にともない, 活発な地震・微動活動が観測された. そこで, この噴火で発生した微動の特性を明らかにして, 火山活動との関連性を探ることを目的とする.

霧島山・新燃岳は2011年1月から活発な噴火活動が始まった. 九州大学では噴火直後の1月28日に, 新燃岳火口から南西に約3km離れた新湯温泉周辺に25台の地震計 (Matsumoto et al., 2013) と1台の広帯域地震計, 大浪池登山口に1台の広帯域地震計を設置し地震観測を開始した. また, 名古屋大学は2月1日に火口から北東方向に約5km離れた夷守台に16点の地震計を設置し (Nakamichi et al., 2013), 同時に2つの地震計アレイでデータを収録した. 先行研究ではそれぞれのアレイ観測点で収録されたデータを別々に解析しているが, 本研究では両方の地震計アレイのデータを用いて微動の発生位置を推定する. また, 霧島山周辺には東京大学, 気象庁, 防災科研によっても地震観測点が展開されている. これらの臨時観測点で収録された波形の振幅情報を用いて, 地震計アレイ解析の結果と比較することで微動の発生メカニズムの推定を試みた.

2011年2月2日, 3日には振幅の大きな微動が観測され, このうち2月2日20時43分から約40分間継続した微動が最も長く顕著であった. 解析ではこの40分間の微動データを扱った. 微動の周波数成分は約1.2, 3, 4Hzにピークをもち, このうち最も振幅の高かった1.5Hz-2.5Hz帯に狭帯域フィルターをかけ解析に用いた. 微動データにMUSICスペクトラム解析 (Schmidt, 1986; Goldstein and Archuleta, 1991) を適用し, 微動の到来方向とスローネスの時間変化を調べた. 均質な地震波速度構造を仮定し得られた微動のスローネスから微動源の空間尤度分布を求めた. 解析の結果, 微動の到来方向から微動の大部分は新燃岳火口方向から到来していたが, 常に一定ではなく到来方向やスローネスには時間変化が見られた. スローネスが大きく表面波と思われる微動の発生源は新燃岳火口周辺に推定され, 比較的長い継続時間を持っていた. また, 火口浅部に発生源が推定された実体波と思われる微動も存在した. さらに, 短い継続時間ではあるが火口から北西に約3km離れた大浪池周辺にも微動源が推定された. この微動源はMatsumoto et al. (2013) でも指摘されており, 地殻変動から推定されている圧力源の方向に近い.

火山周辺では地震波形の振幅データを使った火山性地震や微動の震源決定が行われている (例えば, Yamasato, 1997; Battaglia and Aki, 2003 など). これらの振幅データを用いた震源決定では等方放射が仮定されているが, 本研究では微動の発生源の位置に先の解析結果を利用することで微動振幅の空間分布から微動源の放射特性を推定できる点に注目した. そこで周辺の18観測点で収録された微動データを使用し解析を行った. 観測された振幅には震源の特性 (規模と放射特性), サイト増幅特性, 減衰の影響が入っている. 放射特性は等方的であると仮定し, 2点間の振幅比をとることで震源の影響を除去した. サイト増幅特性はアレイ解析から火口周辺に推定された微動源が正しいとして, その時の振幅比を利用した. 地震波速度構造はアレイ解析と同じで一定としている. 微動の発生メカニズムとして1つの tensile crack を仮定し, その放射特性と比較した. 震源球上の観測点分布が不十分ではあるが, 2カ所の微動源でクラックの向きや傾斜が違い, 火道の形の変化やマグマの振る舞いの空間変化の可能性が示唆された.

本研究では, 複数アレイ観測データの解析により火山性微動の詳細な時空間変化を検出し, 広範囲に分布した周辺の観測点のデータと合わせることでマグマの存在位置や状態の変化を知ることができることを明らかにした. この手法は他の火山にも適用可能である. また, 異なる噴火段階で発生する火山性微動の解析は火山噴火機構の理解により役立つことが期待される.

キーワード: 火山性微動, 新燃岳

Keywords: volcanic tremor, Shinmoedake

## 桜島火山昭和火口の噴火に前駆するBH型地震群発と地盤変動の関係 Relationship BH-type earthquake swarms and ground deformations prior to eruptions at Showa crater at Sakurajima volcano

為栗 健<sup>1\*</sup>; 井口 正人<sup>1</sup>  
TAMEGURI, Takeshi<sup>1\*</sup>; IGUCHI, Masato<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup> DPRI, Kyoto University

### 1. はじめに

桜島火山では1955年から南岳山頂火口において爆発的噴火を繰り返してきた。2000年以降、山頂火口における活動が低下してきたおり、2006年6月に山頂東側斜面にある昭和火口において58年ぶりに噴火が再開した。2009年以降、昭和火口での噴火活動が活発化している。2010年から2013年まで毎年800回を超える爆発的噴火を繰り返しており、爆発回数増加とともに噴火規模が大きくなっている。2013年には噴煙高度が3000~5000mに達する噴火も発生している。そのような活動の中、2011年頃から昭和火口の爆発的噴火や比較的火山灰放出量の多い噴火に関連して、顕著な前兆的地震活動が見られるようになってきた。前駆地震は噴火の1~2時間前から多発する(為栗・井口、2013)。噴火の前には山体膨張を示す地盤変動が観測され、噴火後には急速に収縮する現象が見られ(Iguchi et al., 2013)、前駆地震の発生は地盤変動と密接に関係がある。本講演では、噴火の前駆地震と地盤変動との関連について発表する。

### 2. 前駆地震の特徴と地盤変動の関係

前駆地震を伴う爆発は総数の6%程度であるが、昭和火口の噴火活動が低下した時期に多く発生する傾向がある。前駆地震は噴火の1~2時間前から発生し始め、時間とともに発生間隔が短くなり、振幅が増大することが多い。噴火の数分前には、発生頻度、振幅増大が加速し、連続的に発生して最後には微動のようになることもある。個々の前駆地震の継続時間は10-20秒、卓越周波数は5-6Hzで、明瞭なS波は見られない。桜島火山の火山性地震の分類ではBH型に属する地震である。

噴火前には山体膨張を示す地盤変動が観測されるが、前駆地震は山体膨張開始の30分~1時間後に発生し始めることが多い。山体膨張が進むにつれて、前駆地震の最大振幅が増大していく。山体膨張は噴火の約1時間前に停滞に入ることがあり、前駆地震が発生する噴火では、この停滞を伴う地盤変動が観測されている。山体膨張の停滞期に、前駆地震の発生頻度、振幅増大が加速する。噴火が発生して火山灰やガスが火口から放出されると地盤変動は膨張から収縮に反転する。前駆地震は噴火による収縮とともに発生しなくなる。昭和火口の噴火では膨張過程で複数回の噴火を行い、膨張→小さな収縮を繰り返すことがある。前駆地震は噴火が発生すると一時的に止まるが、再度膨張を開始し、前回の噴火の停滞期のレベルに達すると発生し始めるという特徴がある。

前駆地震の最大振幅の二乗積算カーブを見ると、どの前駆地震活動も噴火前に積算カーブは加速する。噴火により振幅積算値は大小様々であるが、爆発的噴火の前に見られる前駆地震の方が非爆発的噴火より積算レートがより加速している。また、爆発・非爆発に関わらず、噴火後に収縮が大きい(噴出物量が多い)イベントの方が積算レートは加速する傾向が見られる。前駆地震の発生パターンから噴火のタイプや規模が予測可能か検証を行う。

キーワード: 桜島火山, 前駆地震, 地盤変動

Keywords: Sakurajima volcano, precursory earthquake, ground deformation



## マグマに満たされたダイクの流れ誘起振動が引き起こす火山微動 Volcanic tremor caused by flow-induced oscillation of a magma-filled dike

櫻庭 中<sup>1\*</sup>; 山内 初希<sup>2</sup>  
SAKURABA, Ataru<sup>1\*</sup>; YAMAUCHI, Hatsuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院理学系研究科 地球惑星科学専攻, <sup>2</sup> 東京大学地震研究所

<sup>1</sup>Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, <sup>2</sup>Earthquake Research Institute, University of Tokyo

火山微動(トレマー)は、噴火に伴って、もしくはそれに先立って観測される、長周期で継続時間の長い地震動である。火山微動の多くは立ち上がり不明瞭で、とくに噴火にともなって観測される微動では、振動の振幅が指数関数的に増大することが多い(Konstantinou and Schlindwein 2002; McNutt and Nishimura 2008)。この性質は、火山微動が自励振動(定常な外力が系の固有振動を励起し、振幅が指数的に増大し、最終的には非線形効果によりリミットサイクルになるようなもの)によるものではないか、という考えを示唆する。火山下において、地下の定常なマグマの流れが岩盤の自励振動(流れ誘起振動)を引き起こすということは容易に想像できることであり、Julian (1994) が提示したモデルがまさにそれである。ところで流れ誘起振動が原因とされるタコマ海峡橋の崩壊の場合、振動する橋桁は、無限に広がる一様流に平行に置かれた弾性板としてモデル化できる。ここで考えるのは、ちょうどタコマ橋のケースの反対であり、無限に広がる弾性体の中の薄い流体層の流れである。この場合も、流れがじゅうぶん速ければ不安定が起き、火山微動のモデルになりうるものと考えられる。

われわれは、2つの半無限弾性媒質に挟まれた無限に広がる平板層内の流れを考える。これはダイク中のマグマの流れを模擬していて、Julian のモデルを連続体力学をつかって単純化したものに相当する(くわしくは Sakuraba and Yamauchi 2014)。この自励振動モデルで励起される固有振動は表面波である。そこでわれわれは線形化されたナビエ・ストークス方程式を、表面波がある位相速度で弾性媒質中を進行しているという境界条件のもとで、シューティング法をもちいて解き、その複素位相速度を得ることに成功した。そして位相速度の虚部が正になるという不安定条件が、比較的遅いマグマ流速で実現することがわかった。注目すべきことは、もっとも不安定な振動モードが、これまでの同様の研究(Balmforth, Craster and Rust 2005; Dunham and Ogden 2012) で議論されてこなかった、ダイクの反対称変形(屈曲変形)をともなうということである。このとき不安定化するのは、2つの相対するレイリー波で、それらはマグマの流れに逆行する。レイリー波の粒子運動がほぼ円形に近いため、シアをともなうマグマの流れの粘性摩擦によって粒子運動がつねに加速されるつづけることが、不安定の原因である。中立安定を与える臨界流速は波長に反比例するので、不安定が起これば、その波長は系でとりうる最大の長さスケールを越えることはない。ダイクの長さはせいぜい数 km であるので、そのとき励起されるレイリー波の周期は1秒程度である。一方、マグマの流速はせいぜい数 m/s 以下であろうから、臨界波長には下限があり、それは0.1秒程度の周期に相当する。これらにより、われわれのモデルでは、もし不安定が起これば発生する振動の周期が必ず0.1-1秒程度になることになり、これは実際に観測される火山微動の特徴的周期に一致する。また火山微動の線形成長段階の時定数も、われわれのモデルをもちいてよく説明することができる。



## 繰り返し式噴火の規模別頻度分布 Magnitude-frequency distribution of volcanic eruptions from an open conduit

西村 太志<sup>1\*</sup>; 井口 正人<sup>2</sup>; Muhamad Hendrasto<sup>3</sup>; 青山 裕<sup>4</sup>  
NISHIMURA, Takeshi<sup>1\*</sup>; IGUCHI, Masato<sup>2</sup>; MUHAMAD, Hendrasto<sup>3</sup>; AOYAMA, Hiroshi<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 東北大・理, <sup>2</sup> 京大防災研, <sup>3</sup> CVGHM, インドネシア, <sup>4</sup> 北大・理  
<sup>1</sup> Science, Tohoku Univ., <sup>2</sup> DPRI, Kyoto Univ., <sup>3</sup> CVGHM, Indonesia, <sup>4</sup> Science, Hokkaido Univ.

ブルカノ式噴火やストロンボリ式噴火は、短期間に繰り返し発生し多量の地球物理学的データが得られる。そのため、多項目の地球物理学的観測に基づく発生機構に関する研究が進められ、噴火発生時期や規模予測も直前のデータをもとにある程度の経験に実施できる可能性が指摘されるようになった。我々は、2012年火山学会において、これとは別の視点、つまり、ブルカノ式噴火活動の発生間隔や規模の統計的な特徴を調べ、その基本的な特性を明らかにするとともに、噴火予測との関係を調べた。今回、インドネシア国スメル山の繰り返しガス噴出活動に伴うデータを解析するとともに、他火山のデータの再解析も行い、繰り返し噴火の特徴を調べたので報告する。

スメル山の地震波データは、2007年3月中旬から4月上旬に行われた臨時地震観測によるブルカノ式噴火データ、および2010年に設置した山頂定常観測によるガス噴出のデータを用いる。どちらも火口から約500mの地点に設置された広帯域地震計記録である。噴火の発生間隔は短く、かつ、観測点が火口近傍で近いため、噴火に関係しない地震は想定的にきわめて少ない。そこで、この観測点の連続記録からある数居値を超えた振幅を噴火の発生と見なし、噴火(地震)の発生時間と最大振幅を自動的に読み取り、時系列のデータとした。桜島のデータは京都大学防災研究所火山活動研究センターによる爆発リストを用いる。諏訪之瀬島およびインドネシアのロコン山については、我々が実施した観測データをもとに爆発地震のリストを作成した。

噴火地震の最大振幅と発生数についてはべき分布をもとに、これまで多くの火山で石本-飯田式のm値が推定されてきた。本研究も、まずそれらにならない、両対数グラフで上述の火山の噴火地震の振幅と発生数を表示した。その結果、いずれの火山も雄比較的振幅の大きな範囲では直線上にのっているように見えるものの、全体的にみると上に凸となっている。また、最大振幅付近で急激な折れ曲がりがある。一方、片対数グラフで表示すると、全体的にはほぼ直線にのる。火山によっては、振幅の小さなところや、最大値付近での折れ曲がり認められるものの、べき分布と比べると指数分布との一致がよい。このように規模別の累積頻度分布が指数分布で説明できることは、ブルカノ式やガス噴出の繰り返し噴火は、ある平均的な規模をもち、ランダムに発生していることを意味する。繰り返し噴火は、既存の火口を使って噴出物を放出し、爆発地震を励起していることから、火道やマグマ供給系といったサイズを反映している可能性がある。これは異なる火山噴火の規模の評価を規模別累積積算分布をもとに行うことができることを示唆する。

キーワード: 爆発, ブルカノ式, ガス噴出, 規模別頻度分布

Keywords: Volcanic Explosion, Vulcano, Gas burst, Magnitude-frequency distribution

## 斜長石を含むマグマのレオロジー遷移：サヌカイト溶岩の高温一軸変形実験 Rheological transition of plagioclase-bearing magma: high-temperature uniaxial deformation experiments of sanukite lava

石橋 秀巳<sup>1\*</sup>  
ISHIBASHI, Hidemi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 静岡大学大学院理学研究科地球科学専攻  
<sup>1</sup> Graduate School of Science, Shizuoka University

結晶を含むマグマのレオロジー的ふるまいは、結晶量の増加に伴って液体的から固体的へと変化するが、この変化は比較的狭い結晶量範囲で急激におこることが知られており、レオロジー遷移とよばれる。レオロジー遷移のおこる結晶量範囲では、わずかな結晶量の増加によっても粘性率が大幅に上昇するため、その特性を理解することは火山噴火のダイナミクスを考察する上で重要であるといえよう。レオロジー遷移のおこる結晶量範囲は、浮遊結晶の形状や配列に強く依存すると考えられる。近年、Picard et al. (2013) は、斜長石を含む高結晶量合成マグマについて変形実験を行い、結晶量 $\Phi$ が0.2~0.3の近傍においてレオロジー遷移がおこると報告した。しかし、彼らの実験試料では斜長石結晶の方位がランダムであり、比較的方位のそろっている天然のマグマに適用できるとは必ずしもいえない。斜長石の配列は、マグマのレオロジー遷移にどれ程の影響を及ぼすのだろうか？これを明らかにするため、本研究では気泡・斑晶を含まず、主にガラスと板状斜長石から構成されるサヌカイト溶岩について高温一軸変形実験および実験試料の微細組織解析を行った。

実験手法：本研究では、香川県五色台産のサヌカイト溶岩を用いた。この溶岩は、およそ60vol.%の流紋岩質ガラス、36vol.%の板状斜長石と4vol.%の輝石からなり、斜長石は平行に配列している。この溶岩を $10 \times 10 \times 20$  mmの直方体に整形し、965、915、865 °Cの温度、 $3.16 \sim 0.003$  mm / minの変形速度で一軸圧縮実験を行った。実験には、東京大学地震研究所の高温一軸圧縮試験機を用いた。粘性率は、測定した変形速度と応力の関係から、Gent(1960)の式を用いて算出した。変形実験は以下の2つの方法で行った。まず、一定温度の下でステップ状に変形速度を変化させ、粘性率と歪速度の関係を検討した。次に、915 °Cの温度、 $0.1$  mm / minの変形速度の条件で総歪み量を0.11から0.46まで変化させ、粘性率の歪依存性を検討した。変形実験終了後、実験試料を迅速に冷却・回収し、薄片を作成して光学顕微鏡およびSEMによる組織観察とEPMAによるガラス・鉱物の化学分析を行った。

結果：サヌカイト溶岩は、いずれの実験温度においても、歪速度の増加に対して粘性率が減少するshear thinningがみられた。歪速度 $10^{-4}$  s<sup>-1</sup>における粘性率は、965、915、865 °Cでそれぞれ $10^{8.7}$ 、 $10^{9.3}$ 、 $10^{9.4}$  Pa sであり、粘性率は歪速度の-0.36乗に比例する。この値は、先行研究におけるべき指数-結晶量関係の外挿に一致する。メルトの粘性率に対するマグマの粘性率で定義される相対粘度の値は3つの温度で非常によく一致し、歪速度 $10^{-4}$  s<sup>-1</sup>において約 $10^{2.4}$ であった。このことは、約40vol.%の高結晶量溶岩においても、相対粘度のコンセプトが有効に機能していることを示している。歪みの増加に伴い、正則方向に斜長石の方位のそろったマクロなドメインの発達を確認された。しかし、このドメイン構造の発達にともなう粘性率の変化は0.3桁程度と、相対粘度に比べて十分小さかった。このことは、斜長石結晶配列のマクロな構造の発達は、マグマの粘性率に大きな影響を与えないことを示唆している。相対粘度と結晶量の関係を検討したところ、先行研究(例えばIshibashi, 2009; Mader et al., 2013)でみられた関係の外挿とよく一致した。Marron-Pierce式に最小自乗回帰したところ、結晶の最大充填密度 $\Phi_m$ の値として0.43を得た。この値は、Mader et al.(2013)のモデルとよく一致する。

今回の実験結果を先行研究の結果と合わせると、板状斜長石がよく配列している場合、マグマのレオロジー遷移は $\Phi \sim 0.43$ 近傍でおこると考えられる。この値は、Picard et al.(2013)によって提唱された値より有意に大きく、また等方的形状の結晶を含むマグマのそれ( $\Phi \sim 0.6$ )よりも小さい。この結果は、斜長石の配列がレオロジー遷移に強い影響を及ぼすこと、そして斜長石結晶がよく配列している天然のマグマでは、レオロジー遷移は $\Phi \sim 0.43$ 近傍でおこることを示唆している。

キーワード: レオロジー遷移, 粘性率, マグマ, 斜長石, 非ニュートン流体, サヌカイト  
Keywords: rheological transition, viscosity, magma, plagioclase, non-Newtonian fluid, sanukite

## 火道内を上昇する珪長質マグマの流動様式：粘性流動 v s 摩擦すべり Conduit flow of silicic magma: Viscous flow or Frictional sliding?

奥村 聡<sup>1\*</sup>; 上杉 健太郎<sup>2</sup>  
OKUMURA, Satoshi<sup>1\*</sup>; UESUGI, Kentaro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東北大学大学院理学研究科地学専攻, <sup>2</sup> 公益財団法人高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, <sup>2</sup>Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Outgassing rate and bulk magma viscosity that control the style of volcanic eruptions depend on flow type of magma ascending in a volcanic conduit. When magma behaves as a Newtonian fluid, magma in the conduit experiences shear strain large enough to cause effective outgassing. On the other hand, once shear starts to localize, bulk magma viscosity may decrease due to slip deformation and outgassing rate also decreases in parts other than shear-localized region (Okumura et al., 2013 EPSL). Silicic magma experiences shear-induced brittle fracturing and subsequent frictional sliding along the fracturing zone during its ascent (e.g. Gonnermann and Manga, 2003 Nature; Tuffen et al., 2003 Geology). Therefore, outgassing rate and bulk magma viscosity during the ascent are expected to change dramatically. Previous studies (Tuffen et al., 2003 Geology; Gonnermann and Manga, 2005 EPSL) also proposed that fractured magma can heal during magma ascent and that fracturing and healing processes may control the dynamics of magma ascent. In contrast to this model, some experimental studies (e.g. Okumura et al., 2010) indicated that fractured magma cannot heal as long as the deformation continues. In this study, we perform deformation experiments for fractured magma to investigate flow type of magma in the conduit, i.e. viscous flow or frictional sliding, and controlling factors of the transition from viscous flow to frictional sliding.

The deformation experiments were carried out using a custom-made torsional deformation apparatus which was installed in synchrotron radiation X-ray imaging system (BL20B2) of SPring-8. To simulate fractured silicic magma, we crushed rhyolite obsidian and sorted them into fragments of 75-250  $\mu\text{m}$  in size. The powdered sample was sandwiched by two obsidian discs and they were twisted by rotating a piston attached with a rotational motor. The torsional deformation experiments were performed at temperatures of 800 and 900  $^{\circ}\text{C}$  under 1-10 MPa pressures. The rotational rate was set to be 0.1 to 10 rpm, corresponding to strain rates of  $10^{-2}$  to  $1 \text{ s}^{-1}$  if the sample deforms homogeneously. The deformed samples were observed in situ using an X-ray radiography.

At a temperature of 900  $^{\circ}\text{C}$  and rotational rates of 0.1-1 rpm, homogeneous deformation through a sample was observed under a pressure of 10 MPa, which indicates viscous deformation. In contrast, the sliding at the interface between powdered obsidian and the disc was observed under 1 and 5 MPa pressures. At a temperature of 800  $^{\circ}\text{C}$ , the sliding was found under 1-10 MPa pressures. These results indicate that frictional sliding along fractured zone is flow type of magma in shallow parts of the conduit (<10 MPa).

We assume that flow type is determined by competition of shear stress necessary for viscous flow and frictional sliding. If magma has high viscosity and shear stress to deform a sample viscously is large, the flow type becomes frictional sliding. At a temperature of 900  $^{\circ}\text{C}$ , viscous flow and frictional sliding were found at 10 and 1-5 MPa pressures, respectively. At this condition, magma viscosity is approximately  $10^7 \text{ Pa s}$  (Hess and Dingwell, 1996) and shear stress necessary for viscous deformation is 1 MPa at a strain rate of  $0.1 \text{ s}^{-1}$ . Because the frictional sliding was observed at pressures of 1-5 MPa, the frictional coefficient is estimated to be ca. 0.1. When we use this value and the criterion for shear-induced brittle fracturing proposed by Okumura et al. (2010), the dynamics of magma ascent is controlled by frictional sliding at shallow parts of the conduit. In addition, silicic magma can ascend quickly due to low frictional coefficient of fractured magma.

キーワード: 珪長質マグマ, 火山噴火, 粘性流動, 摩擦すべり, 放射光 X 線

Keywords: Silicic magma, Volcanic eruption, Viscous flow, Frictional sliding, Synchrotron radiation X-ray



## 発泡マグマ模擬材料における脆性的遅れ破碎のメカニズム Mechanism of delayed brittle-like fragmentation of vesicular magma analogue

亀田 正治<sup>1\*</sup>; 志田 司<sup>1</sup>; 市原 美恵<sup>2</sup>; 津郷 光明<sup>1</sup>; 奥村 聡<sup>3</sup>; 上杉 健太郎<sup>4</sup>

KAMEDA, Masaharu<sup>1\*</sup>; SHIDA, Tsukasa<sup>1</sup>; ICHIHARA, Mie<sup>2</sup>; TSUGO, Mitsuaki<sup>1</sup>; OKUMURA, Satoshi<sup>3</sup>; UESUGI, Kentaro<sup>4</sup>

<sup>1</sup> 農工大・工・機シス, <sup>2</sup> 東大・地震研, <sup>3</sup> 東北大・理・地学, <sup>4</sup> 高輝度光科学研究センター

<sup>1</sup>Mech. Sys. Eng., TUAT, <sup>2</sup>ERI, Univ. of Tokyo, <sup>3</sup>Earth Sci., Tohoku Univ., <sup>4</sup>JASRI

マグマの破碎は火山爆発をつかさどるカギとなる現象である。破碎は、固体的（脆性）破碎と流体的（延性）破碎に分けることができる。脆性破碎は延性破碎に比べて危険である。なぜなら、マグマに含まれる気泡内に閉じ込められているガスが破碎によって急激に放出することで、爆発的噴火を引き起こすと考えられるからである。

マグマは Maxwell 型粘弾性体であり、現象の特性時間に応じて、固体的にも流体的にも振る舞い得る。我々は、10 年余りにわたって、ユニークなマグマ模擬材料である酸素気泡入り水あめを用いて、急減圧にともなう破碎に対する粘弾性の影響を明らかにする実験を進めてきた (Kameda et al. GRL 2008; Kameda et al. JVGR 2013)。

一連の実験を通して、我々は、「脆性的破碎」という、脆性破碎と延性膨張との中間に位置する現象があることを見出した。この現象は、マグマの粘弾性特性が流体的な性質を帯びるタイムスケールにおける固体的破碎と定義される。マグマの粘弾性緩和時間と天然の火山噴火から見積もられる減圧特性時間との比較から、実際の火山では脆性的破碎が生じていると考えられる。

可視光を用いた高速度ビデオ撮影から、脆性的破碎は、試料に生じたき裂から試料内のガスが急激に放出することをきっかけに生じていることがわかった。試料サイズを変えたさらなる観察 (Shida et al. IAVCEI 2013) から、試料サイズを小さくすると、脆性度 (Ichihara and Rubin JGR 2010) が 1 に近い (すなわち固体的にふるまう状況) であっても、破碎が起きにくくなることがわかった。我々の試料は、サイズを小さくすると、内部の気泡分布がより均一になる。この観察は、脆性的破碎を引き起こす試料内部で進展するき裂は、試料内の気泡分布が不均一な部分をきっかけに生じていることを示唆している。

次に、我々は、試料内部を X 線マイクロ CT 撮影によって観察した。高輝度光科学研究センターの放射光施設 (Spring-8, BL20B2) に実験装置を持ち込んで撮影を行った。減圧開始前の試料の初期状態を 3 次元 CT 撮影によって調べた。高速度ラジオグラフィによって急減圧にともなう試料の動的挙動をとらえた。撮影は、視野 16 mm × 5 mm、空間分解能 8 μm/pixel の条件で CCD カメラを用いて実施し、試料台を 0° から 180° まで回転させながら 1800 枚の透過像を撮影して CT 再構成を行った。ラジオグラフィ撮影は 200 frames/s で行った。以上の実験から、我々は、脆性的破碎の発生をとらえることに成功した。試料の三次元再構成像から、脆性的破壊は、大きな気泡の周りに存在する小さい気泡の連結部や切欠き部をきっかけに生じていることがわかった。

以上を踏まえると、脆性的破碎は、次のような過程を経て生じていると推察される：(1) 気泡の連結によって初期き裂が延性的に成長する。(2) き裂先端の応力集中と脆性度がある瞬間に臨界値を上回ると、脆性破壊に移行する。(3) クラックの開口によって試料内のガスが放出されそのあたりの圧力が急激に減少することで局所的に脆性度が高まり、試料の一部が破碎に至る。このような延性的なき裂の成長と部分破碎が繰り返し起こることで脆性的破碎が進行する。

キーワード: マグマ, 破碎, 粘弾性, 急減圧, X 線 CT

Keywords: Magma, Fragmentation, Viscoelasticity, Decompression, X-ray CT



## 火山現象のダイナミクス解明のための観測によるアプローチ Approach by volcanic observation for dynamics of volcanic phenomena

井口 正人<sup>1\*</sup>  
IGUCHI, Masato<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> 京都大学防災研究所  
<sup>1</sup> DPRI, Kyoto University

火山現象のダイナミクスを解明するためにこれまでに様々な観測手法が活動的火山において適用されてきた。最も基本的なマグマの動きは、地下深部から火口直下へのマグマの上昇と噴火に伴うマグマの放出である。マグマの蓄積、移動、上昇などの動きを最も的確に把握できる観測は地盤変動観測であるが、過去においてはキラウェアのように多量の溶岩を流出させ、マイクロラディアン以上の地盤変動を伴う噴火活動についてしか、その一連の動きを捉える事ができなかった。ナノラディアン、ナノストレインオーダーの地盤変動検出を可能としたのが、観測坑道に設置された傾斜計、伸縮計による高感度観測であり、現在は観測井の計器や火口への近接観測により同程度の微小変動を多くの火山噴火について検出することが可能となっている。このような変動のうち、噴火に前駆する変動の速度はほぼ一定の場合もあるが、加速する場合や減速する場合もあり、多様である。2009年以降頻繁に繰り返される桜島・昭和火口におけるブルカノ式噴火では変動率が小さくなるのが一般的であり、応力中心の下方への移動か、火口浅部に蓄積されるエネルギーのリークにより説明可能である。

火山爆発の力学的モデルとして、爆発的噴火に伴い発生する地震動は減圧力源とシングルフォースにより、励起されることが知られている。これは、高圧マグマを封入している蓋が取れることによって発生すると考えられた (Kanamori et al., 1984)。爆発が発生する前に検出される火山体の隆起・膨張は高圧マグマの存在を示唆し、爆発的噴火に伴い火山体の沈降・収縮が観測されることから、第1次近似として成り立つモデルである。一方、爆発地震は火口底の破裂以前に発生しているので、蓋が取れることにより爆発地震が発生するのではなく、爆発地震が発生することにより噴火が発生するとしなければならない。桜島の爆発地震は表面での噴火発生前の1~1.5秒前に等方膨張をもってはじまり (Tameguri et al., 2002)、さらにその1~2分前に緩やかな収縮が観測される。火口底における爆発の直前には白煙がリークしているのが多くの火山で目視されている。これらの一連の現象は、火道上部に形成されたガス溜りからの火山ガスのリークとそれによる減圧が過飽和状態にあるマグマの急激な発泡を引き起こし、示唆する (Iguchi et al., 2008)。このことは火山爆発が高圧マグマの減圧により発生することを意味するが、それが観測により確かめられたことになる。

キーワード: ブルカノ式噴火, 桜島  
Keywords: vulcanian eruption, Sakurajima