

富士火山宝永噴火の地震トリガー説の岩石学的検証 A petrological test of the earthquake-trigger model of the Mt. Fuji Hoei eruption

有賀 貴史^{1*}; 中村 美千彦¹; 奥村 聡¹; 吉本 充宏²

ARUGA, Takafumi^{1*}; NAKAMURA, Michihiko¹; OKUMURA, Satoshi¹; YOSHIMOTO, Mitsuhiro²

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻, ² 山梨県富士山科学研究所

¹Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University, ²Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government

It is fairly widely recognized that huge earthquakes may trigger volcanic eruptions. The statistic validity of this “hypothesis” is, however, under debate. Besides, only little is understood about the triggering mechanisms and resulting incubation period from the earthquake to the eruption. The Hoei eruption of the Fuji volcano in 1707 A.D. occurred 49 days after the Hoei M 8.7 earthquake, and thus often referred as a typical example of the earthquake-triggered eruption. This clear paleographic record of the incubation period provides us an excellent opportunity to test the cause-and-effect link between the huge earthquake and magmatic eruption. Fujii (2002) proposed a triggering mechanism of the Hoei eruption, in which basaltic magma injected into the shallow dacitic magma chamber and induced volatile exsolution. In this study, we elucidate the timescale from magma injection to eruption from the mineralogical record in the Hoei erupted materials, and compare the result with the known interval of 49 days.

We found reverse zonings of plagioclase phenocrysts in the basaltic scoriae. The phenocrysts were considered to have been derived from the dacite magma because their core compositions are consistent with those in the silicic magma initially erupted in the Hoei sequence. Based on the measured MgO concentration profiles, we can estimate the timescale of magma mixing and then test the scenario that the Hoei eruption was triggered by the Hoei earthquake. The temperature of basaltic magma of the Hoei eruption was estimated to be 1080-1180 (Sato & Hara, 1990). With this temperature range, the timescales of magma mixing were calculated to be 45.9, 9.6 and 2.2 days at 1080, 1130 and 1180 °C, respectively. Because these estimated timescales are shorter than 49 days, the mixing should have started after the Hoei earthquake. On the other hand, the estimated timescales are longer than the duration of the Hoei eruption, showing that the mixing was not syn-eruptive but pre-eruptive. These results support a model that the Hoei earthquake triggered the injection of basaltic magma into the shallow dacite magma chamber, leading to the Hoei eruption.

キーワード: 富士火山, 宝永噴火, 宝永地震, 噴火トリガー, 微量元素拡散

Keywords: Fuji Volcano, Hoei Eruption, Hoei Earthquake, Eruption Trigger, Tracer Element Diffusion

大地震が富士山周辺のダイクシステムに及ぼす静力学的影響の評価 Evaluation of elastostatic effects of large earthquakes on the dike system around Mt. Fuji

細野 将希^{1*}; 三井 雄太²; 石橋 秀巳²
HOSONO, Masaki^{1*}; MITSUI, Yuta²; ISHIBASHI, Hidemi²

¹ 静岡大学理学部, ² 静岡大学理学研究科

¹Faculty of Science, Shizuoka University, ²Institute of Geosciences, Shizuoka University

地震が火山システムに与える力学的影響を議論した近年の研究 (Chesley et al., 2012) では、1707 年の宝永 (南海トラフ) 地震と 1703 年の元禄関東地震による富士山下の主ダイク (北西-南東走向) 上の静的応力変化を、半無限均質媒質におけるグリーン関数を利用して計算した。彼らの結果では、宝永 (南海トラフ) 地震の場合のみ主ダイク南東側の深部においてダイクが開くような法線応力変化が働き、浅部では逆にダイクが閉じるような応力変化が生じたため、49 日後の爆発的な富士山宝永噴火に繋がったとされた。

本研究では、まず同先行研究の追試を行った上で、2011 東北地震の直後に活性化したと地震活動から推定できる副ダイク (北北東-南南西走向) についても、同様の数値計算を行った。考察するシナリオ地震として、上記の 2 種類だけでなく、過去に近隣で起きた M8 級以上の地震である 2011 年の東北地震および 762 年の美濃-飛騨-信濃地震の断層モデルも考察した。この他、規模こそ小さめではあるが富士山の近場で発生し得る潜在的な地震として、富士川河口断層帯が活動した場合についても考察した。

結果、上記の宝永 (南海トラフ) 地震では、主ダイクとは異なり、副ダイクでは全体が閉じる方向に応力変化が生じることがわかった。元禄関東地震と美濃-飛騨-信濃地震では、双方のダイク共に全体が閉じる方向に応力変化が変化する。一方、2011 東北地震の場合は双方のダイク共に全体が開く方向に応力変化が変化する。富士川河口断層帯の活動では、双方のダイク共に浅部が開いて深部が閉じる方向に応力変化するという結果が得られた。

このように、大地震が富士山のダイクシステムに与える力学的影響は多様であり、(宝永地震や東北地震の後に見られたように) 大地震がダイクの活動の on-off を入れるスイッチとして働く場合もあると考えられる。この考えに則れば、2011 東北地震が起きた直後である現在から次の南海トラフ地震が発生するまでは、副ダイク沿いの火山活動リスクが通常時よりも高いことになる。

キーワード: 富士山, ダイク, 大地震, 静的応力変化

Keywords: Mt. Fuji, dike, large earthquakes, static stress changes

富士火山宝永噴火末期におけるマグマ上昇過程の変化；斜長石マイクロライトからの制約 Magma ascent process during the late stage of Fuji 1707 eruption; constraints from plagioclase microlite

天野 大和^{1*}; 石橋 秀巳¹; 外西 奈津美²; 安田 敦²
AMANO, Yamato^{1*}; ISHIBASHI, Hidemi¹; HOKANISHI, Natsumi²; YASUDA, Atsushi²

¹ 静岡大学大学院理学研究科, ² 東京大学地震研究所

¹ Graduate School of Science, Shizuoka university, ² Earthquake Research Institute, University of Tokyo

1707年におきた宝永噴火は、富士火山で最も新しい噴火である。富士火山の噴火はほとんどが玄武岩質のストロンボリ式噴火、或いは、溶岩流噴火であるのに対し、宝永噴火は富士火山では珍しいプリニー・準プリニー式噴火をおこし、玄武岩だけでなくデイサイトと安山岩を噴出した。噴火はおよそ15日間続き、3日目を以降、玄武岩質マグマのプリニー・準プリニー式噴火を継続したことが知られるが、宝永第一火口中の火砕丘の存在は、噴火の最終段階でプリニー式からストロンボリ式へと噴火様式を変えたことを示している。しかし、この様式変化の要因は明らかにされていない。そこで本研究では、宝永噴火末期の玄武岩質スコリアの鉱物化学組成と岩石組織からマグマの上昇プロセスを推定し、噴火様式が変化した要因を検証した。

プリニー式噴火の降下スコリア堆積物は、宝永火口から東へ8kmの地点で採取した。粒子の特徴に基づいてHo-I~IVに4区分し、更に細かく17のユニットに分けて採取した。本研究では宝永噴火後期を対象としているため、採取したスコリアのうちHo-IVの6ユニットを対象とした。これに、宝永第一火口中の火砕丘で採取したスコリアを加えた計7ステージの試料について、斜長石マイクロライトの化学組成・サイズ・数密度の分析を行った。マイクロライトの化学組成は、東京大学地震研究所のEPMA (JEOL-8800R) によって測定した。マイクロライトのサイズと数密度の測定は、静岡大学道林研究室のSEMによって撮影したBSE画像の解析によって行った。

プリニー式噴火とストロンボリ式噴火のスコリアは共にほぼ無斑晶質で、構成鉱物の組み合わせも同じであった。斜長石マイクロライトの最大An値 $[=Ca/(Ca+Na)]$ 、最大サイズと結晶数密度は、プリニー式噴火のスコリアでそれぞれ約74.4、約191 μm 、約1240/mm²、ストロンボリ式噴火のスコリアでそれぞれ約78.3、約293 μm 、約881/mm²と、両者の間で明瞭な差が見られた。プリニー式噴火に比べてストロンボリ式噴火のスコリアの方が、An値と結晶サイズは大きく、数密度は小さい値を示した。

わずかに含まれるオリビン・斜長石斑晶とメルトの相関係から、宝永噴火のマグマの温度を約1135℃と見積もった。そして、マグマがこの温度で等温上昇したと考え、Putirka (2008) の斜長石-メルト含水量計によってマイクロライトの晶出開始圧力を見積もった。その結果、プリニー式噴火ではおよそ21MPaであったのに対し、ストロンボリ式噴火ではおよそ24MPaとやや高压であることが分かった。それぞれの圧力は、深さ840-870m および940mに相当する。さらに、Toramaru et al. (2008) のマイクロライト数密度減圧速度計を用いて、マイクロライト晶出深度におけるマグマの上昇速度を見積もったところ、プリニー式噴火でおよそ54km/h、ストロンボリ式噴火でおよそ36km/hの値が得られ、プリニー式噴火の方が約1.5倍速かったことがわかった。この結果から、宝永噴火最末期のプリニー式-ストロンボリ式噴火様式変化は、火道上昇速度の減少によって引き起こされたと考えられる。また、この火道上昇速度減少の原因は、およそ700mよりも深部での火道条件の変化（火道径の減少や過剰圧の減少）にあると考えられる。

キーワード: 富士火山, 斜長石, マイクロライト, 火道上昇速度, スコリア, 噴火様式

Keywords: Fuji volcano, plagioclase, microlite, conduit ascent velocity, scoria, eruption style

火砕物リサイクリングが支配する玄武岩質火山の小規模爆発様式 Recycling of pyroclasts controls style of small basaltic explosion at Stromboli Volcano, Italy

三輪 学央^{1*}; 川口 亮平¹; 西村 太志²; 青山 裕³; 山田 太志³; 藤田 英輔¹
MIWA, Takahiro^{1*}; KAWAGUCHI, Ryohei¹; NISHIMURA, Takeshi²; AOYAMA, Hiroshi³; YAMADA, Taishi³; FUJITA, Eisuke¹

¹ 防災科学技術研究所, ² 東北大学, ³ 北海道大学
¹NIED, ²Tohoku Univ, ³Hokkaido Univ

Understandings of controlling mechanism on eruptive style is one of the most important subject not only for volcanology but also for hazard mitigation. Vesiculation, outgassing and crystallization that drive or break their ascent have been considered as essential factors for the controlling mechanism (e.g., Jaupart and Allegre, 1990; Houghton and Gonnerman, 2005). In contrast, recent studies have suggested that vigorous recycling of pyroclast into the vent occurs at basaltic volcano where small explosions are repeated (D'Oriano et al., 2014; Eychenne et al., 2014). The recycling of pyroclast that fills the vent can affect explosion dynamics such as shape and ejection speed of jet cloud (Goto et al., 2001; Ohba et al., 2002; Taddeucci et al., 2013).

This study examined component, texture, granulometry and chemical composition of ash samples from normal activity at Stromboli to discuss a controlling mechanism of explosion style of small basaltic explosion. Stromboli volcano has three vent regions as northeast (NE), central (C), and southwest (SW) craters. The three craters emitted white steam continuously that was interrupted by relatively strong explosion. During studied term (14:26-18:29, May 21th, 2014), different explosion styles were observed in each vents. The NE crater exhibited explosive emission of ash rich cloud, and the C and SW craters showed emission of glowing bomb with dilute ash cloud. We collected falling ash from the three craters every 4-18 minutes. Although the samples contain ash particles from the three craters, ash falling rate at sampling site becomes large after occurrence of ash rich explosion at NE crater. The ash particles are divided into Juvenile (glassy particle with elongate, spongy, or dense morphology), Recycled (non-glassy particles with highly crystalline which has similar texture with product of reheating experiment of basaltic ash; D'Oriano et al., 2013), Altered, and Crystal particles. The origin of the each type of particles are interpreted on the basis of their external and internal textures observed under stereoscopic and electron microscope (D'Oriano et al., 2014). We calculated bulk componentry using the componentry variations with grain size (125-250, 250-500, 500-1000, and 1000-2000 μ m) and grain size distribution. The bulk componentry shows that the volume fraction of recycled particles increases with ash falling rate at sampling site that concurs the occurrence of ash rich explosion at NE crater.

The ash observation implies that burial of eruptive vent by recycled particles relates with occurrence of ash rich explosion at NE crater. The explosion occurs at which the gas rich magma from deeper conduit (e.g., Ripepe et al., 2001; Lautze and Houghton, 2007) reaches to the boundary between magma column and buried sediment. Emission of gas jet by the explosion blows the sediment which buries the vent-conduit (Patrick et al., 2007). Thick sediment can store large amounts of gas, magma and heat that generate ash rich cloud at the blowing. Therefore, we suggest that thickness of buried sediment is one of a controlling factor for the style of small basaltic explosion.

キーワード: 噴火様式, リサイクリング, 玄武岩質マグマ, 火山灰, ストロンボリ火山
Keywords: eruptive style, recycling, basaltic magma, volcanic ash, Stromboli volcano

ストロンボリ火山の火道内マグマ圧力の時空間分布の推定 Spatio-temporal changes of magma pressure in the conduit at Stromboli as inferred from analyses of tilt records

川口 亮平^{1*}; 西村 太志²; 青山 裕³; 山田 大志³; 三輪 学央¹; 藤田 英輔¹; Genco Riccardo⁴; Lacanna Giorgio⁴; Ripepe Maurizio⁴
KAWAGUCHI, Ryohei^{1*}; NISHIMURA, Takeshi²; AOYAMA, Hiroshi³; YAMADA, Taishi³; MIWA, Takahiro¹; FUJITA, Eisuke¹; GENCO, Riccardo⁴; LACANNA, Giorgio⁴; RIPEPE, Maurizio⁴

¹ 防災科学技術研究所, ² 東北大・理, ³ 北大・理, ⁴ フィレンツェ大
¹ NIED, ² Science, Tohoku Univ., ³ Science, Hokkaido Univ., ⁴ Firenze Univ.

近年、爆発的噴火に伴う傾斜変動記録が火口極近傍で観測され、噴火直前に発現する山体の膨張といった現象が捉えられるようになってきた。これらのデータを解析することで、噴火直前のマグマ上昇過程を定量的に把握できるようになると期待されている。我々は2014年5月末よりイタリア・ストロンボリ火山の火口極近傍に傾斜計と広帯域地震計を設置し臨時観測を行った。この観測により得られた噴火に先行する傾斜変動記録から噴火直前の火道内マグマ圧力の時空間変化の推定を行ったので報告する。

ストロンボリ火山の火口群から距離500m以内の3点(RFR, PZZ, CPL)に傾斜計と1点(RFR)に広帯域地震計を50cm程度の深さに設置した。これらの信号はサンプリング周波数100Hzで連続収録した。3観測点全てで噴火に伴う傾斜変動が記録された7月中旬までの記録から、噴火発生の5分前から他の噴火によるシグナルが無く、噴火に伴う地震動に先行して加速的な傾斜変動が見られる26個のイベントを抽出してその特徴を調べた。その結果、噴火に伴う地震動発生の数分前から概ね火口方向の隆起を示す傾斜変動が始まり、地震動の発生までに100-400 nano radian程度の傾斜変動の増加が全ての観測点で記録されることがわかった。また、噴火の5分前からの傾斜ベクトルは地震動の約5秒前からRFR観測点で反時計回り、CPL点で時計回りにベクトルの向きが変化していることがわかった。これらの特徴は解析した26個のイベント中22個のイベントで認められる。これら22個のデータを地震動の発生時刻を基準として重畳し、傾斜ベクトルの方位角を調べると、RFR点は162.5°方向の隆起が地震動の発生時から5秒前に165.5°に、CPL点は87°から77°に変化した。また、PZZ点は常に113°方向の隆起を示した。

観測された傾斜ベクトルの特徴から、火道内部の圧力源の時空間分布を推定する。NE火口の直下に250mの鉛直火道を設置し、境界要素法によってストロンボリ火山の地形を取り入れて山体変形を計算した。25mの区間ごとに一定圧力を与えて計算した結果、圧力源の深さの違いによって地表に現れる傾斜ベクトルの方向と観測点間の振幅比が顕著に変化することがわかった。観測データと数値計算結果の比較によって、CPL点の約10°の方位角の変化を説明するためには、圧力源の重心が約50mほど深くなる必要があることがわかった。また、RFR点とPZZ点の方位角を説明するためには、噴火に伴う地震動発生5秒前より以前の圧力源の深さは火口下50-100m程度であることがわかった。これらのことから、ストロンボリ式噴火の数分前から火口からの深さ50-100m程度の場所で圧力の増加が始まり、噴火の直前に圧力源は火口下約150m程度まで深くなっていると考えられる。このような火道内圧力源の時空間分布の特徴は今後ストロンボリ式噴火のメカニズムを理解する上で重要であると考えられる。

キーワード: 傾斜変動, ストロンボリ式噴火, 圧力源
Keywords: Tilt motion, Strombolian eruption, Pressure source

玄武岩質マグマの先行注入を伴わないプリニー式噴火：桜島火山歴史時代噴火の例 Plinian eruptions without precursory basalt injection: Case study of the Sakurajima historic eruptions

新谷 直己^{1*}; 中村 美千彦¹; 奥村 聡¹
ARAYA, Naoki^{1*}; NAKAMURA, Michihiko¹; OKUMURA, Satoshi¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹Department of Earth Science, Graduate School of Science, Tohoku University

Injection of new magma into a shallow differentiated magma chamber is often considered as a trigger of volcanic eruptions. This is primary based on the petrological observation that magma mixing precedes the eruptions by a short interval. However, some petrological records such as oscillatory zoning of phenocrysts, in addition to geophysical monitoring of active volcanoes (e.g. Iguchi et al., 2008), suggest that magma injections had occurred repeatedly without triggering eruptions immediately. In such a case, the mafic magma injection may be regarded as a preparation process for eruption rather than a trigger. To clarify the magma injection and accumulation processes prior to the past large eruptions is crucial for forecasting the volcanic activity. For this purpose, we investigated the pumice clasts of the three historic Plinian eruptions of the Sakurajima volcano, Kyusyu Japan in 1914-1915 (Taisho Era), 1779-1780 (Anei) and 1471-1476 (Bunmei). We have focused on compositional zoning of magnetite phenocrysts, because element diffusion in magnetite is relatively fast and thus has high time resolution.

The magnetite phenocrysts showed scarce compositional zoning in all the eruptions. This result indicates that the last magma injections occurred more than a few months before the eruptions. Hence, we infer that the magma injection did not trigger the historic eruptions immediately. This leads to an implication that a Plinian eruption may occur in the Sakurajima volcano without the injection of new magma prior to several months.

キーワード: 桜島火山, 噴火トリガー, 磁鉄鉱, マグマ注入, マグマ混合

Keywords: Sakurajima Volcano, eruption trigger, magnetite, magma injection, magma mixing

溶岩チューブ洞窟と溶岩樹型の空洞内部に見る溶岩鍾乳と溶岩石筈から推定される溶岩の表面張力 Estimation of surface tension of lava from lava stalactite and lava stalagmite appeared in lava tube cave and tree mold

本多力^{1*}
HONDA, Tsutomu^{1*}

¹ NPO法人火山洞窟学会

¹ NPO Vulcano-Speleological Society

[はじめに] 玄武岩溶岩流によって形成される溶岩チューブ洞窟や溶岩樹型の空洞内部にはよく溶岩鍾乳や溶岩石筈が観察される。溶岩鍾乳とは天井や側壁に付着した溶岩層が重力により不安定となり規則的な凹凸を形成し天井や側壁から溶岩が垂れ下がる現象で、一方溶岩石筈とは溶岩の液滴が天井より落下し床部に堆積固化する現象である。天井や側壁に生じる溶岩表面の凹凸の配列の規則性と溶岩液滴が床面に落下して堆積する液滴体積から溶岩の表面張力を推定してみた。

[溶岩鍾乳の配列ピッチによる表面張力推定] 天井に付着した溶融溶岩層は重力により下側に膨らもうとするが、一方表面張力はそれを阻止しようとする。天井の溶融膜流体方程式に微小攪乱を与え、二次以上の項を省略すると線形方程式が得られ、その安定性限界条件から、液体層の波動の固有ピッチ $P=2\pi(\gamma/g\rho_L)^{1/2}$ が得られる。ここで γ は溶岩の表面張力、 g は重力加速度、 ρ_L は溶岩の密度である。したがって洞窟あるいは樹型内部の天井からたれ下がる溶岩鍾乳や側壁の凹凸のピッチ P を測ることにより溶岩の表面張力 $\gamma = P^2 g \rho_L / 4 \pi^2$ を求めることが出来る。各所の溶岩チューブ洞窟や溶岩樹型から得られるピッチはおおよそ $P=3\sim 4\text{cm}$ であり、 $\rho_L = 2.5\text{g/cm}^3$ 、 $g = 980\text{cm/s}^2$ を入れると表面張力として $\gamma = 560\sim 990\text{ dyne/cm}$ が得られる^{1,2)}。

[溶岩石筈を構成する落下液滴による表面張力推定] 溶岩液滴は天井の液体層から直接落下する場合もあるし天井からストローを形成した後そこから溶岩の液滴が落下する場合もある。液滴はある長さになると落下しその落下する液滴の形状はほぼ同じである。この現象にも液滴の表面張力が関与しており、表面張力が液滴の重量に耐えられなくなると液滴は引きちぎられて液滴は落下し、落下した後上部では液滴が供給されさらに落下を繰り返して床部に多くの液滴が堆積する。これには液体の表面張力を計測する一般的な方法である「液滴重量法」を適用することが出来る。液滴の質量を m とすると液滴を下に引く力は $f_1 = mg$ (g は重力加速度) で、一方これに対抗して上に引き上げようとする表面張力は $f_2 = 2\pi r \gamma$ である。ここで r は液滴の外形の半径、したがって $f_1 = f_2$ の時の液滴の重量がわかれば γ は計算できる。落下するときの液滴の長さを l とすると $f_1 = mg = \pi r^2 l \rho_L g$ で、ここで ρ_L は液滴の密度である。玄武岩溶岩はおおよそ 2.5 g/cm^3 でありここでは一定値とした。この関係により落下した液滴の長さ l と半径 r から溶岩の表面張力、 $\gamma = r l \rho_L g / 2$ を得ることが出来る。ここで $g = 980\text{cm/s}^2$ である、実際の観察による多くの値、たとえば $r = 0.2\text{cm}$ 、 $l = 2\text{cm}$ とすると $\gamma = 490\text{ dyne/cm}$ 、 $r = 0.25\text{cm}$ 、 $l = 4\text{cm}$ とすると $\gamma = 980\text{ dyne/cm}$ である。

[おわりに] 国内外各所の実際の観察によると、溶岩洞窟と樹型の天井と側壁の流体力学的不安定性と落下液滴から推定される溶岩の表面張力値はほぼ一致する。これはこの検討おデルが妥当であることを示していると思われる。結論として、溶岩洞窟内の溶岩鍾乳・溶岩石筈の形成においては、溶岩の表面張力が支配的な役割を演じていると言えそうである。また推定された表面張力値はおおむね横山・飯塚³⁾によって実験室で計測された値の外挿の範囲にある。今後さらに他所(富士山青木が原、阿蘇米塚、キラウエア火山、セントヘレンズ火山、メデイスン・レーク火山、クレーター・オブ・ザ・ムーン等)を含めた溶岩チューブ洞窟と溶岩樹型の調査(溶岩密度の影響等を含めて)を続行してゆきたい。

[参考文献]

- 1) T. Honda (2000): 富士山溶岩樹型空洞内の溶岩鍾乳の形成過程の研究 (The investigation on the formation process of the lava stalactite in the lava tree mold of Mt. Fuji)、日本洞窟学会第26回大会 研究発表要旨集 p.3
- 2) T. Honda, F. Martel, V. Bello, O. Lucas-Leclin (2014): A2-26: Investigation on the lava of 1998-2007 and lava tube caves in the Reunion Island, The 2014 fall meeting of the Japanese Society of Volcanology. p.38
- 3) I. Yokoyama, S. Iizuka (1970): Technical Report, Hokkaido Univ. p.57

キーワード: 溶岩チューブ, 火山洞窟, 表面張力, 溶岩樹型

SVC46-07

会場:304

時間:5月24日 17:45-18:00

Keywords: lava tube, volcanic cave, surface tension, lava tree mold

火山名、地域	珪酸重量分率(出典)、噴火年	種類	鍾乳の P(ピッチ), 石筍の r (半径) 及び t (長さ)	推定表面張力
富士山、犬涼み山、三ツ池穴	49.09%(津屋), 7000 年前	洞窟	r=0.2~0.25cm, t=2~4cm P=3~4cm	490~980 dyne/cm 560~990 dyne/cm
伊豆大島, 三原山	52~53%(水上), 1951 年	洞窟	P= ~3cm	~560 dyne/cm
島根県, 大根島	47%(沢), 19 万年以上前	洞窟	P= ~3cm	~560 dyne/cm
仏国, レユニオン島, フルネーズ火山	48.8~49.8%(N. Villeneuve), 1998 年 48~50% (A. Peltier), 2004 年,	洞窟	r=0.2~0.25cm, t=2~4cm P=3~4cm	490~980 dyne/cm 560~990 dyne/cm
ベトナム、南部中央高原 チュールック火山	48~52% (N. Hoang)	洞窟	P=3~4cm	560~990 dyne/cm
富士山, 剣丸尾, 船津胎内	50.88%(津屋), 937 年	樹型	P=3~4cm	560~990 dyne/cm
富士山, 剣丸尾, 吉田胎内	50.88%(津屋), 937 年	樹型	P=3~4cm	560~990 dyne/cm
伊豆大島, 三原山	52%(中野, 山元), 1986 年	樹型	P= ~4cm	~990 dyne/cm
三宅島, 雄山	53~54% (藤井他), 1983 年	樹型	r=0.1~0.25cm, t=5cm	610~1530 dyne/cm
八丈島, 西山	50.4~50.5%(津久井), 1100 年以上前	樹型	P=3~4cm, r=0.2~0.25cm, t=2~4cm	560~990 dyne/cm 490~980 dyne/cm
米国, オレゴン州、 ニューベリー火山、 溶岩鍾型の森	49~50%(J. Donnelly), 7000 年以上前	樹型	P=3~5cm	560~1740 dyne/cm

溶岩ドーム破壊で始まったケルウト火山2014年のプリニー式噴火 Plinian eruption preceded by disruption of lava dome at Kelud volcano, Indonesia, in 2014

前野 深^{1*}; 中田 節也¹; 吉本 充宏²; 嶋野 岳人³; 外西 奈津美¹; Akhmad Zaennudin⁴; 井口 正人⁵
MAENO, Fukashi^{1*}; NAKADA, Setsuya¹; YOSHIMOTO, Mitsuhiro²; SHIMANO, Taketo³; HOKANISHI, Natsumi¹; AKHMAD, Zaennudin⁴; IGUCHI, Masato⁵

¹ 東京大学地震研究所, ² 山梨県富士山科学研究所, ³ 常葉大学大学院環境防災研究科, ⁴ CVGHM, インドネシア, ⁵ 京都大学防災研究所火山活動研究センター

¹ Earthquake Research Institute, University of Tokyo, ² Mount Fuji Research Institute, Yamanashi Prefectural Government, ³ Graduate School of Environment and Disaster Research, Tokoha University, ⁴ Center for Volcanology and Geological Hazard Mitigation, Indonesia, ⁵ Sakurajima Volcano Research Center, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

Kelud volcano, Indonesia, is an active andesitic stratovolcano that has repeatedly erupted over many centuries. After a quiescent period since the dome-building eruption in 2007-2008, a plinian eruption with a radially spreading umbrella cloud at 18 km height occurred in February 2014. We present results of field observations, and discuss the sequence of this plinian event, with estimation of some physical parameters controlling eruption dynamics.

Eruptive deposits can be divided into three major units, Unit A to C, which corresponds to the main stages of this event. Unit A is pyroclastic density current deposits characterized by massive, poor-sorted, and composed of pumice, lithics and woods fragments. The distribution is limited to the northeastern side of the volcano, and extends up to ~5 km from the summit. In distal area, this unit consists of a thin fine ash layer. Numerous trees blown down on the substrate in the northeast also belongs to the same unit. Unit B is pyroclastic fallout deposits. In proximal area, the unit is characterized by thick fallout deposits containing large pumice clasts and lava blocks. This unit underlies numerous ballistic ejecta originating from andesitic lava dome produced in 2007-2008. In distal area, the same unit is recognized as a thin ashfall layer. This unit is widely distributed from north to southwest. At Jogjakarta ~200 km away, ~2 cm ashfall was observed. This observation is consistent with satellite data showing the plinian plume drifted by strong easterly wind and dispersed mainly western side of the volcano. Unit C is poor-sorted, pumice-rich pyroclastic density current deposits that are distributed along southern and western valleys up to 3-4 km. Multiple, pumice-rich flow lobes are well developed. Large pumice clasts are generally concentrated in the upper part and flow front of the deposits. In the northern side, this unit is recognized as normally graded, fine ashfall layers. After the eruption, a number of secondary phreatic explosions occurred from the valley-filled pumice-rich deposits, and created explosion craters.

Volume of tephra fallout from all stages is estimated to be 0.32-0.46 km³, using relationships between dispersal area and tephra thickness. A total volume of pyroclastic density current deposits for Stages 1 and 3 was estimated to be ~0.1 km³ based on the deposit distribution and thickness assumption. Duration of plume development was estimated to be 2.5-3 hours based on satellite images. From the tephra volume and eruption duration, mass discharge rate was calculated to be in the range 5.6-8.6*10⁷ kg/s.

Our field observation suggests that, in Stage 1, pyroclastic density currents run at least 5 km to the northeastern side with blowing off vegetation including numerous trees. Perhaps, the 2007-2008 lava dome acted as a cap-rock of conduit, and it was partially destroyed from the northern edge. Initially, the eruption couldn't produce a buoyant steady column from an open conduit, but generated energetic and directed pyroclastic density currents (like a blast) from the partially disrupted dome. Then, the dome was completely destroyed and blown away by ascending magma, and the eruption entered the stable plinian phase, Stage 2. Within 3 hours, magma discharge rate decreased, and column collapse began. The eruption stage moved to Stage 3, when pumice-rich pyroclastic density currents occurred. They could run along valleys and buried them with multiple pumiceous flow lobes.

The plinian eruption in 2014 was characterized by a strong eruption plume preceded by blowing off lava dome and generation of energetic pyroclastic density currents. Also other pyroclastic density currents by column collapse followed the plinian eruption. Deposit data suggests that the scale of eruption is ranked as VEI 4 and one of the largest eruptions at Kelud volcano in the last few centuries.

キーワード: ケルウト火山, プリニー式噴火, 溶岩ドーム, 火砕流, 火砕サージ
Keywords: Kelud, Plinian, Lava dome, Pyroclastic density currents

噴煙や溶岩中への大気取り込みの指標としての磁硫鉄鉱の酸化反応 Pyrrhotite oxidation as an indicator of air entrainment into eruption columns and lava flows

松本 恵子^{1*}; 中村 美千彦¹
MATSUMOTO, Keiko^{1*}; NAKAMURA, Michihiko¹

¹ 東北大学大学院理学研究科地学専攻

¹ Department of Earth Science, Graduate School of Science, TOHOKU University

火山噴火の地表面現象のダイナミクスには、噴煙や火砕流への大気を取り込みで生じる浮力やマグマの冷却が重要な役割を果たしている。我々は、噴霧流や高浸透性マグマへの大気混合過程を実際の噴出物から定量化する手法を開発している。噴火に際して、マグマは地下の還元環境から地表の高酸化（高 fO_2 ）環境へと急激に上昇し、その過程でマグマに含まれる硫化鉄鉱物は酸化する。その反応は高温（マグマの温度）下で数十秒から数十時間という、噴火の継続時間に対応した時間スケールで進行するため、噴火ダイナミクスを反映している可能性がある。Matsumoto and Nakamura (2012) は、桜島大正噴火のプリニー式噴火降下軽石中に、磁硫鉄鉱 (Po) から磁鉄鉱 (Mt) への酸化途中の組織を見出し記載した。噴火様式が異なれば、火道浅部～地表でのマグマと大気との混合や冷却の過程にも違いが生じると予想されるため、本研究ではさらに大正噴火の火砕成溶岩（安井ほか、2007）と溢流溶岩中での反応進行度を調べ、酸化反応時間の見積りを行った。

Po にしばしば見られる酸化組織は反射顕微鏡観察とラマン分光分析から Mt と Hm（赤鉄鉱）と同定した。Po とその酸化組織について、反応進行度を定量化するため、各粒子に占める鉱物相の面積割合を各噴出物あたり約 30 粒子測定した。軽石では、一粒子中に Po と Mt あるいは Po・Mt・Hm 三相が存在するのが特徴で、火砕成溶岩では Po がほとんど残存せず完全に Hm 化している粒子が大多数であり、溢流溶岩では Po のみ、Po・Mt, Mt・Hm, Hm のみといった複数の段階の粒子が存在するものの、軽石のように三相同時には存在しなかった。また、Mt・Hm 中の Ti の EPMA による X 線元素マッピングを行ったところ、軽石と火砕成溶岩試料では Mt・Hm とともに Ti を含有しなかったが、溢流溶岩では Mt に Ti の拡散が認められた。

このような、噴火様式による Po 粒子の酸化組織の相違は、「高温・高酸化維持時間」に対する「到達 fO_2 」で整理できる。「到達 fO_2 」は (A) 噴火開始前のマグマ (B) Po と Mt の平衡 (C) Mt と Hm の平衡 (D) 大気 fO_2 の目盛を与えられる。これらの fO_2 は、桜島大正噴火の温度範囲 950～1050 °C において (A) $10^{-7.5} \sim 10^{-9.0}$ bar (B) $10^{-6.9} \sim 10^{-8.3}$ bar (C) $10^{-4.7} \sim 10^{-6.2}$ bar (Matsumoto and Nakamura, 2012; Huebner and Sato, 1970; Eugster and Wones, 1962) (D) $10^{-0.7}$ bar (地表の酸素分圧) と求められる。一方、「高温・高酸化維持時間」には、(i) Po から Mt への酸化反応時間 (ii) Mt から Hm への酸化反応時間 (iii) Mt 中の Ti の拡散時間 をもとに見積った目盛を与えられる。すると、プリニー式噴火軽石の到達 fO_2 は、酸化組織が無い約半数の粒子では (B) 以下、残り約半数は Hm が存在したため (C) を超え、まれに存在する Hm の無い粒子は (B) と (C) の間となる。酸化反応途中の粒子は多いものの、Hm 化が完了した粒子は存在せず Mt に Ti の拡散も見られなかったことから、軽石の急冷までの時間は 3.5 時間未満と見積られる (iii)。軽石は、マグマ破碎後に火道および噴煙中で様々な程度に大気と接触しつつ冷却すると考えられるので、その程度に応じて個々の粒子の反応度がばらつくと解釈できる。火砕成溶岩中の粒子はほとんどが Hm 化を完了していたため、到達 fO_2 は (C) 以上で、急冷または系の閉鎖により反応が停止するまでに 6.3～22 時間経過したと解釈できる (ii)。火砕成溶岩は、軽石同様に一旦は破碎を経験して効率的に大気 fO_2 環境にさらされた上に、その後噴出物が再溶結したために軽石よりも高温・高酸化状態が長く持続し、酸化反応が十分に進行したと解釈できる。溢流溶岩では、約半数の粒子が (B) 以下で残りは (B)～(D) で分散していた。酸化時間は (iii) から 3.6～33 時間と推定される。溢流溶岩の fO_2 のばらつきは、開放系脱ガス時の局所的な破碎と溶結や、大気と接触したマグマ表面の内部への巻き込みなどを反映している可能性がある。

以上の結果は、Po の酸化反応が、想定される一連の噴火様式とよく対応づけられ、また斑晶の破碎度や溶結組織などから独立に判定された火砕成溶岩と溢流溶岩の分類とも調和的であることを示す。よって、Po の酸化反応の程度は、噴火時の噴煙や溶岩への大気取り込みの指標になる可能性がある。

キーワード: 酸化, 大気取り込み, 磁硫鉄鉱, fO_2 , 桜島

Keywords: oxidation, air entrainment, pyrrhotite, fO_2 , Sakurajima

御嶽山2014年噴火から示唆される水蒸気噴火の発生機構のモデル Model of phreatic eruptions inferred from the 2014 eruption of Ontake Volcano

井田 喜明^{1*}
IDA, Yoshiaki^{1*}

¹ アドバンスソフト株式会社
¹ Advance Soft Co.

2014年9月27日に御嶽山の山頂で水蒸気噴火(水蒸気爆発)が発生し、噴煙に巻き込まれたり噴石の直撃を受けたりして登山者など50名以上が亡くなった。水蒸気噴火はどここの火山でもよく起こる現象であるが、相対的に噴火の規模が小さいこともあって、マグマを噴出する噴火に比べて発生機構の理解が遅れている。今回の御嶽山噴火ではビデオ映像、地殻変動、地震活動など、噴火の発生過程を究明する上で貴重なデータが得られた。本論文はこれらのデータを考慮して水蒸気噴火の発生機構を探り、噴火過程をシミュレーションするためのモデルを提案する。

御嶽山山頂の南東側に設定された国土交通省滝超観測点のビデオカメラには、噴出点の真上には雲がかかっているものの、噴火が開始した9月27日11時55分前後の噴火映像が見事に記録されている。噴火は噴気がかすかにたなびく状態で突然始まり、黒みがかかった水蒸気を激しく噴出した。噴出気体はまず火砕流として火口から広がって3kmほど流下し、数分後に上昇に転じて噴煙となった。レーダー観測によると、噴煙は火口から8kmもの高さに達した。同日午後上空からヘリコプターで撮られた映像によると、14時頃には噴出が弱まり、水蒸気が数か所の噴出孔から分離して上昇するのが見分けられた。

ビデオ映像に捉えられた噴火開始直後の噴出気体は、色が濃くて火砕流として流れ下ったことから見て、多量の固体粒子を含んで密度が大気より高かった。噴火が多数の噴石を飛ばし、地面が火山灰に厚く覆われた事実もそれを裏付ける。噴出気体は、固体粒子を堆積して軽くなってから、上昇に転じて噴煙となったと解釈できる。固体粒子は噴出時に噴出孔の浸食でつくられたものだろうから、噴出孔が浸食されて拡大したことが激しい噴出をもたらしたと推測できる。

噴火の発生過程を探るためのもうひとつの重要な観測データに、気象庁田の原観測点で得られた傾斜変化がある。このデータによると、噴火開始の7分ほど前から噴火発生地点の地下で膨張が進行し、噴火による気体の噴出とともに膨張が徐々に解消された。

噴火発生源の膨張は地下水が蒸発して水蒸気が増えたことが原因だろうが、単純な蒸発はすぐに圧力増加に進行を抑制されるから膨張には結びつかない。噴火発生源の膨張は、重力下で何らかの物質が上昇するときによく起こる。ここでは、地下水の底で生まれた水蒸気が表面まで上昇する間に進行する膨張を考える。膨張を示す傾斜変動の開始時に顕著な地震活動は見られないから、深部から供給された熱によって地下水の底で不安定が起こり、急に沸騰が始まって気泡を生み出したと想定する。

以上の考えを定量化して、地下水系で水蒸気噴火が発生する過程をモデル化する。地下水系は下部の地下水と上部の水蒸気からなり、接触面では蒸発曲線に沿う熱力学的な平衡が成り立つものとする。地下水の底で生ずる水蒸気の流量は、外部条件として時間の関数として設定する。日常的な噴気や噴火時の激しい噴出は、地下水系を覆う岩板を水蒸気が浸透流として通り抜ける過程で表現する。浸食による噴出孔の拡大は浸透率の増加で表現し、浸透率が変化する速度は噴出流量と浸透率の適当な関数として設定する。

このモデルでは、圧力や噴出流量などの変数の時間変化は、保存則や熱力学的な関係から導かれる連立常微分方程式から計算される。計算に関与する定数、関数、初期値を適当に調整すると、噴火前の膨張から急激な噴出に至る水蒸気噴火の発生過程を定性的に説明する解が求まり、定数の値や浸透率の関数形が実際の噴火の進行に合うように制約される。

キーワード: 水蒸気噴火, 水蒸気爆発, 御嶽山, 火砕流, 地殻変動, 数値シミュレーション

Keywords: phreatic eruption, phreatic explosion, Ontake Volcano, pyroclastic flow, crustal deformation, computer simulation

火砕流ダイナミクスに関する数値的研究：浅水波方程式に基づく2層密度流モデルの開発 A numerical study of pyroclastic flow dynamics: Development of a two-layer model based on Shallow-Water equations

志水 宏行^{1*}; 小屋口 剛博¹; 鈴木 雄治郎¹
SHIMIZU, Hiroyuki^{1*}; KOYAGUCHI, Takehiro¹; SUZUKI, Yujiro¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

火山噴火でしばしば発生する火砕流は、火砕物粒子と火山ガスから成る混相流が周囲大気との密度差を駆動力に流動する密度流であり、幅広い密度比 ρ/ρ_a ($\sim 10^0$ - 10^3) をもつという特徴がある (ここで ρ は火砕流の密度、 ρ_a は周囲大気の密度)。また、その伝播速度などのダイナミクスは、火砕流内における火砕物粒子の沈降、周囲大気の取り込み (エントレインメント) などの様々な物理過程の影響を受ける。本研究の目的は、火砕流ダイナミクスにおけるこれらの効果を理解することである。そのために、浅水波方程式を基にした火砕流モデルを開発し、そのモデルを解析解や自己相似解が知られているダム・ブレイク問題に適用することによって、上述した効果を評価した。

幅広い ρ/ρ_a をもつ火砕流を浅水波方程式で正しく解くためには、先端における駆動力と周囲抵抗の力学的バランスを表す先端条件を正しく解く必要がある。先行研究では、先端条件の取り扱いに関する数値手法として、先端条件を境界条件として解く Boundary-Condition (BC) タイプモデルと、先端よりも先の領域に静止した微小な仮想流体層を置いて先端の計算を行う Artificial-Bed (AB) タイプモデルが提案されている。本研究では、ダム・ブレイク問題の解析解を用いた検証によって、 $\rho/\rho_a \geq 100$ では AB タイプモデルを用いることができ、 $\rho/\rho_a \leq 100$ では BC タイプモデルを用いるべきであることを明らかにした。さらに、これまでの BC タイプモデルを改善し、先端において保存則を数理的に正しく解く信頼性の高いアルゴリズムを開発した。

確立した数値手法を用い、ダム・ブレイク問題における流れの時間発展に対する ρ/ρ_a の影響、特に粒子沈降とエントレインメントの効果を含まない系において ρ/ρ_a の影響がどのように変化するかを調べた。粒子沈降には、先端の伝播速度を減衰させ、流れを不連続によって頭部と尾部に分離させる効果があり、その不連続の形成は ρ/ρ_a が大きくなるに従って早まる。エントレインメントには、先端の伝播速度を減衰させ、頭部と尾部の分離を抑制する効果があり、また、エントレインメントの激しさは ρ/ρ_a が大きくなるに従って激しくなる。粒子沈降とエントレインメントの両方の影響がある場合、それぞれのもたらす効果の競合によって、頭部・尾部境界の不連続の形成など、流れの様相にバリエーションが生じると考えられる。

火砕流は、一般には上部の低濃度部 ($10^0 \leq \rho/\rho_a \leq 10^1$) と下部の高濃度部 ($\rho/\rho_a \sim 10^3$) から成り、それによって大きな密度勾配をもつ。そのような密度勾配を持つ火砕流のダイナミクスを再現するためには、低濃度部を BC タイプモデル、高濃度部を AB タイプモデルで解く 2 層流モデルを適用する必要がある。本研究では、より現実的な火砕流ダイナミクスの再現を目指し、低濃度部には粒子沈降とエントレインメントの効果を、高濃度部には粒子沈降や底面抵抗の効果を導入した 2 層流モデルの定式化と実装を行い、低濃度部・高濃度部・堆積物の時間発展について予察的結果を得た。

キーワード: 火砕流, 密度流, 重力流, 浅水波方程式, 2 層流モデル

Keywords: pyroclastic flows, density currents, gravity currents, Shallow-Water equations, two-layer model

降下火砕堆積物の分布から供給源を推定する逆解析手法の確立：鉛直拡散と噴煙形状の影響 Effects of vertical diffusivity and plume shape on the inversion analysis of tephra fallout deposits

清杉 孝司^{1*}; 小屋口 剛博¹; 鈴木 雄治郎¹
KIYOSUGI, Koji^{1*}; KOYAGUCHI, Takehiro¹; SUZUKI, Yujiro¹

¹ 東京大学地震研究所

¹Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

降下火砕堆積物からその供給源の情報を得ることは、過去の爆発的噴火の噴煙ダイナミックスの再現や、それに基づく噴火時の降灰予測などのため、火山学上重要な意義がある。本研究は、火山灰の移流拡散モデルに基づいて、降下火砕堆積物から噴煙における火砕物供給源の性質(高さ, 供給量, 火砕物粒径)を正しく求める逆解析手法を確立することを目的とする。

移流拡散モデルを用いて降下火砕堆積物から供給源のパラメータを推定する逆解析については、これまでに Klawonn et al., (2012) や, Mannen (2014) などの研究例が報告されている。これらの逆解析では、鉛直方向の粒子の拡散を無視したり、風による噴煙の湾曲を無視するという仮定がなされている。本研究では、火口上の一点から放出された単一粒径からなる複数の粒子が一樣風速の大気中で移流・拡散する様子と、その地表における堆積量分布を見積もることによって、これらの仮定の妥当性について検討した。

一樣風速の大気中で火口上の一点から放出された単一粒径の粒子は、拡散によって時間とともに拡大する「粒子群」を形成する。粒子群の中心は風速の大きさと水平方向へ移動し、粒子の終端速度の大きさと鉛直方向へ降下する。鉛直方向の粒子の拡散を無視した場合、粒子群は水平円盤状に拡大し、地表において堆積量が二次元正規分布となる。一方、鉛直方向に粒子が拡散する場合、粒子群は楕球状の形態を持つ。鉛直方向へ厚みを持った粒子群では、底部の粒子と頂部の粒子の堆積に時間差が生じる。また、粒子群の底部の粒子が着地した後も、頂部の粒子が着地するまで粒子群は風によって水平方向に移動し続ける。その結果、堆積量分布は、二次元正規分布から、(1) 分布のピークの先鋭化、(2) ピーク位置の非対称化、(3) 風と平行方向への分布の伸びの3通りのズレが生じる。これらのズレのうち、(1) と (2) は、粒子群が堆積しつつさらに鉛直に拡散し続けることに起因し、 $(D_z/v_t z)^{1/2} \geq 0.2$ の場合に顕著になる。ここで D_z は鉛直拡散係数、 v_t は終端速度、 z は給源高度である。また、(3) のズレは、厚さを持った粒子群が堆積しつつ風に流されることに起因し、風速を W 、水平拡散係数を D_h とした時、 $D_z^{1/2} D_h^{-1/2} W v_t^{-1} \geq 3$ の場合に顕著になる。

一般に、風の影響下において、噴煙は風下に向かって湾曲する。噴煙の湾曲量が堆積物分布に与える影響について、噴煙の湾曲量と降下中の粒子の移流量を比較することによって評価した。次元解析および風の影響を考慮した噴煙モデル(例えば、BENTモデル; Bursik 2001)によると、風速 W の下で湾曲した、浮力を原動力とする弱い噴煙の高度 z と湾曲量 x の関係は、 $z = C B^{1/3} W^{-1} x^{2/3}$ という近似式で表すことができる(Wright 1971)。ここで C は定数、 B は有効浮力フラックス(Sparks et al., 1997)である。一方、降下中の粒子の移流量 b は給源高度 z とその粒子の終端速度 v_t 、風速 W から $b = z W / v_t$ と計算される。噴煙の湾曲量 x の値が粒子の移流量 b の値に比べて十分小さい場合 ($x/b < n$; n は 10^{-1} のオーダーの定数)、噴煙の湾曲による影響は無視できる。しかし、 x が b と比べて大きい場合 ($x/b > n$)、湾曲の影響は無視できない。この場合、噴煙の湾曲量の近似式と移流量の式の比較から、 $C^{-3} B^{-1} z W v_t^2 \geq n^2$ となることがわかる。

以上の結果は、大きな風速に加え、細かい粒子が低い高度から放出されたときに鉛直拡散の影響(二次元正規分布からのズレ)が大きく、逆に粗い粒子が高い高度から放出された場合に噴煙形状の影響(堆積距離のズレ)が大きくなることを示す。上で導いた鉛直拡散と噴煙形状の影響評価の関係式より、いずれの影響も少ない粒子の終端速度は限られた範囲にあることがわかり、その範囲は $W z (D_z D_h)^{-1/2} < 75$ の時に $D_z / 0.04 z \leq v_t \leq n C^{3/2} B^{1/2} z^{-1/2} W^{-1/2}$ であり、 $W z (D_z D_h)^{-1/2} > 75$ の時には $W D_z^{1/2} / 3 D_h^{1/2} \leq v_t \leq n C^{3/2} B^{1/2} z^{-1/2} W^{-1/2}$ である。こうした粒径と堆積物分布の特性は、火砕堆積物分布から噴煙の高さ等を求める逆解析において注意されなければならない。

キーワード: 噴煙, 降下火砕堆積物, 移流拡散モデル, 逆解析

Keywords: volcanic plume, tephra fallout deposits, advection-diffusion model, inversion analysis

デジタル画像解析を援用した降下火山灰の形状・流速同時測定の実験
A trial of measurement for shape and velocity of ash-fall by using a digital image analysis technique

服部 康男^{1*}; 中尾 圭佑¹; 須藤 仁¹
HATTORI, Yasuo^{1*}; NAKAO, Keisuke¹; SUTO, Hitoshi¹

¹ 電力中央研究所
¹ Central Research Institute of Electric Power Industry

Accurate descriptions of terminal velocity of ash-fall are practical interest in volcanic ash risk assessment on critical infrastructure (e.g. Wardman et al. 2012). Numerical simulations with an ash transport- and deposition-model, which has a capability to estimate spatial- and temporal-distributions of ash concentration and deposition, have become a powerful tool of the risk assessment (e.g. Folch 2012). Such simulations give the solution of governing equations on ash transport processes with numerical procedures. The governing equations include some empirical formulas with assumptions. Also for the estimation of terminal velocity of ash-fall, many empirical formulas have been already reported, but there exists considerable scattering of calculations among them (e.g Folch 2012).

In the present study, we examined a measurement for shape and velocity of ash-fall by employing a digital image analysis technique. We configured the experimental setup based on a shadowgraph particle measurement system of Dantec Dynamics to deal with non-spherical particles. The particles were illuminated by high-intensity pulsed lasers, Nd: YAG laser, with an optical diffuser. A CCD camera was placed in front of the light source, and the camera was equipped with a long-distance microscope lens to obtain visualized images of small particles. We carried out a trial measurement for sedimentation of corrected ash and discussed the optimization of measurement parameters and relationship between shape and velocity of ash-fall in a laboratory test. More details will be presented in the presentation, and we believe that our study must be helpful to develop the numerical simulations for evaluation of volcanic ash risk.

The authors wish to express our gratitude to Mr. Y. Futawatari of Dantec Dynamics, Ltd., Mr. T. Sato and Mr. K. Ota for helpful comments on the design of the optical setup, and to Mr. K. Toshida, Dr. D. Miura and Dr. S. Takeuchi for fruitful discussions on this study.

キーワード: 沈降速度, 可視化流速計測, 室内実験, 火山灰輸送-堆積モデル
Keywords: Terminal fall velocity, Particle image velocimetry, Laboratory test, Ash transport- and deposition-model

Stokes-DEM 法によるマグマだまりの粒子-流体混相シミュレーション Stokes-DEM coupled simulation for a granular media of magma chamber

古市 幹人^{1*}; 西浦 泰介¹

FURUICHI, Mikito^{1*}; NISHIURA, Daisuke¹

¹ 数理科学・先端技術研究分野, 海洋研究開発機構

¹Department of Mathematical Science and Advanced Technology, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

The dynamics of a granular media has been suggested to play an important role in a reheated magma chamber by a hot intrusion (e.g. Burgisser and Bergantz, 2011). Although several mechanisms, such as Rayleigh Taylor instability, unzipping, and rhythmic convection (e.g. Shibano et.al. 2012, 2013) have been proposed for characterizing an evolution of crystalline magma chamber, their contributions in the long geodynamical time scale are not clear yet. Thus we performed dynamical numerical simulations of the granular material in three dimensions to investigate the thermal evolution of the magma chamber.

In order to solve high-viscosity fluid and particle dynamics for modelling a melt-crystal jammed state of the magma, we have developed a coupled Stokes-DEM simulation code with two key techniques: formulation of particle motion without inertia and semi-implicit treatment of particle motion in the fluid equation (Furuichi and Nishiura, G-cubed, 2014). Our simulation can successfully handle sinking particles in a high-viscosity fluid.

In our simulation, the top fluid-particle jammed layer is heated by the hot basal fluid at the bottom. This initial setting represents the first-stage toy model for an erosion process at a melting roof of the magma chamber. We have investigated the dynamical patterns of the settling particles which strongly depend on the rheology of the granular layer. In addition, we have also examined the dynamical role of the density of the basal hot melt. Our numerical result indicates the possibility of the spontaneous formulation of crystal rich layer on the basal dense melt layer.

Keywords: Magma chamber, Viscous granular material, Magmatic dynamics, Reactivation, Discrete element method, Stokes flow

1次元火道流・3次元火山噴煙統合モデルを用いた爆発的噴火の推移予測 Forecasting the transition of explosive volcanic eruptions using a combined model for conduit flow and eruption column

小屋口 剛博^{1*}; 鈴木 雄治郎¹
KOYAGUCHI, Takehiro^{1*}; SUZUKI, Yujiro¹

¹ 東京大学地震研究所

¹ Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

爆発的噴火において、地球物理学的観測や地質学的・岩石学的データに基づいて噴火推移を予測することは可能か？本研究では、この問いに答えるため、1次元定常火道流モデルと3次元非定常火山噴煙モデルを連結した「統合モデル」を用いてシミュレーション解析を進めている。本発表では、統合モデルを用いた爆発的噴火の推移予測の理論的枠組み、及び、そこから見えてくる噴火推移予測に向けた課題について議論する。

爆発的噴火においては、一般に、火道上端付近でマグマの上昇速度が音速に達している。この場合、マグマ溜りから噴煙までのマグマの運動は、大局的に(1)マグマ溜りから音速に達するレベル(ここでは、そのレベルを「火口底」と定義する)までの上昇過程、(2)火口における膨張・圧縮過程、(3)大気中での噴煙運動、という3つの領域に分割できる。1次元定常火道流モデルによると、(1)の領域の流れ(例えば、流量)は、マグマ溜りの圧力、マグマ溜りから火口底までの長さ、火道径、マグマの含水量、粘性等に依存する(Koyaguchi, 2005)。(2)の火口における膨張・圧縮過程については、火口形状のパラメータ(火口底の深さおよび火口上端下端の断面積比)を与えることによって、火口上端における噴出物の圧力と速度を流量の関数として求めることができる(Koyaguchi et al. 2010)。1次元定常噴煙柱モデル(例えば Woods, 1988)によると、(3)の噴煙運動において、圧力が大気圧と平衡に達した後の噴煙ダイナミクス(噴煙柱崩壊や噴煙規模)は、主に、噴出率、マグマの温度(熱容量)・含水量、大気圧と平衡に達した時点での上昇速度、大気との混合効率で決まる。ただし、大気圧に達するまでの膨張・圧縮過程は、3次元火山噴煙モデル(例えば Suzuki et al. 2005)で直接計算する必要がある。以上の議論から、爆発的噴火の推移は、マグマの性質やマグマ溜りの圧力に加えて、火道や火口の形状の影響を含めた膨張・圧縮過程に支配されることが示される。

爆発的噴火の推移に対する火道・火口の形状の影響を評価するために、本研究では、火口形状と噴出圧力・噴出速度を関係付ける近似解析解を導出するとともに、大気圧と異なる圧力で噴出した噴煙の膨張・圧縮過程が噴煙の内部構造やダイナミクスに与える影響について3次元噴煙モデルを用いて系統的に調べた。火口上端から火砕物と火山ガスの混合物が大気圧と異なる圧力で噴出した場合、噴煙軸部の流れが垂直衝撃波によって減速し、周縁部に鞘状高速流が発達するという特徴的な構造を形成する。大気圧と平衡に達した時点での噴煙の上向き平均運動量流束は、これらの低速部と高速部のそれぞれの速度及びその断面積比から計算され、その値は1次元定常膨張・圧縮モデル(Woods and Bower, 1995)の予測値と概ね一致する。従って、3次元噴煙モデルによる計算結果は、噴煙柱崩壊や噴煙規模などの噴煙全体の大局的振る舞いについては、1次元定常膨張・圧縮モデルと1次元定常噴煙柱モデルを組み合わせた場合の計算結果(Koyaguchi et al., 2010)と定性的に一致する。一方、低速軸部と高速周縁部よりなる噴煙内部の不均質構造は、部分崩壊による火砕流発生や噴煙柱の振動現象など、1次元定常噴煙柱モデルでは表現されない現象をもたらす。これらの噴煙ダイナミクスの特徴は、火口形状と火口底の流量に関するパラメータ空間上のレジームマップとして整理することができる。

実際の噴火においては、噴火の経過とともにマグマ溜りの圧力と火道・火口の形状が同時に変化する。また、地殻変動・噴煙の高度等の観測量、火砕堆積物の地質学的データ、噴出物の岩石学データに基づいて、マグマ溜りの圧力、マグマの性質、噴出率、火道・火口の形状などに関するパラメータが、誤差を含んだ状態で推定される。誤差を含む観測データに基づいて爆発的噴火の推移予測を行うためには、マグマ溜りの圧力変化と火道・火口の形状変化の典型的シナリオに対する噴煙ダイナミクスの推移について、上記レジームマップ上で整理分類し、観測データから確実に読み取れる情報を予め把握しておく必要がある。

キーワード: 火道流, 火山噴煙, 数値モデル, 噴火推移予測

Keywords: conduit flow, eruption column, numerical model, transition of eruption style

2014年5月10日桜島爆発的噴火のMPレーダー観測 MP radar observation of the explosive eruption of Sakurajima on May 10th, 2014

佐藤 英一^{1*}; 福井 敬一¹; 新堀 敏基¹; 石井 憲介¹; 高木 朗充¹; 山内 洋¹; 真木 雅之²
SATO, Eiichi^{1*}; FUKUI, Keiichi¹; SHIMBORI, Toshiki¹; ISHII, Kensuke¹; TAKAGI, Akimichi¹;
YAMAUCHI, Hiroshi¹; MAKI, Masayuki²

¹ 気象研究所, ² 鹿児島大学

¹Meteorological Research Institute, ²Kagoshima University

火山噴煙が気象レーダーで捉えられることは1960年代後半から知られていたが、その定量的把握技術はまだ確立していない。一方、定量的降水推定(QPE)や粒子判別(HC)などの領域で、MP(二重偏波)気象レーダーによる技術が急速に発達してきている。現在、我々は気象レーダーによる噴煙の定量的観測技術(QAE)の開発を目指しているが、疑似エコーがQAEの障害の一つとなっている。

本研究では、2014年5月10日桜島噴火の事例を対象に、粒子の不均一性を表す偏波間相関係数(ρ_{hv})による疑似エコー領域の特定を試みた。また、この手法で特定された噴煙領域および疑似エコー領域におけるレーダーパラメータの頻度分布を解析した。その結果、疑似エコー領域は複数の要因に依存していたと考えられる。

キーワード: 火山噴煙, MPレーダー, 二重偏波レーダー, 疑似エコー

Keywords: volcanic plume, MP radar, polarimetric radar, false echo

Xバンド偏波レーダおよびKaバンドドップラーレーダによる桜島火山の噴煙柱の観測 Observations of Sakurajima Volcanic Ash Column with X-band Polarimetric Radar and Ka-band Doppler Radar

真木 雅之^{1*}; 前坂 剛²; 棚田 俊收²
MAKI, Masayuki^{1*}; MAESAKA, Takeshi²; TANADA, Toshikazu²

¹ 鹿児島大学地域防災教育研究センター, ² 防災科学技術研究所

¹Research and Education Center for Natural Hazards, Kagoshima University, ²National Research Institute for Science and Disaster Prevention

桜島火山の二つの爆発的噴火事例について、Xバンド偏波レーダとKaバンドドップラーレーダのデータを解析して噴煙柱の内部構造を調べた。第一の噴火事例は2013年8月18日の噴火で、噴煙柱高度が火口から5.5kmまで達し、桜島から約10kmに位置する鹿児島市内に降灰をもたらした。火口から約10kmに配置された現業Xバンド偏波レーダの観測データ(5分間隔, 1.7°~20°の12仰角)を線形補間して、時間30秒間隔, 仰角0.5°間隔の3次元ボリュームデータを作成した。データの種別は反射強度, ドップラー速度, 反射因子差, 水平と垂直偏波の相関係数である。3次元データの解析から、噴火直後の噴煙柱内は一様な構造ではなく複数の反射強度のコアからなっていることがわかった。ドップラー速度から火口直上で約60m/sの噴出速度が検出された。噴煙柱が風下に流れていく過程ではふるい分け効果による粒径分布の均質化と降灰粒子の落下姿勢の一様化が示唆された。二番目の事例は2014年5月10日の噴火で噴煙高度は火口から4500mであった。この事例では、Xバンド偏波レーダデータに加えて、火口から3.6kmに設置された研究用Kaバンドドップラーレーダの高感度・高時空間分解能のデータを解析した。Kaバンドレーダによる噴煙柱の鉛直断面解析から、噴火から最大高度に達するまでの噴煙柱の内部構造の変化を明らかにした。

キーワード: 気象レーダ, Kaバンドレーダ, 火山灰雲, 反射因子, ドップラー速度, サイズソーティング
Keywords: Weather radar, Ka-band radar, volcanic ash column, reflectivity, Doppler velocity, size sorting