

観測と素過程の研究の連携について

On linkage between researches based on observation and of elementary processes

篠原 宏志^{1*}

SHINOHARA, Hiroshi^{1*}

¹ 産業技術総合研究所

¹ Geological Survey of Japan, AIST

近年はどの分野でも多項目観測や異なる研究手法の連携が重要視されている。私は他の分野の状況を良く理解している訳ではないが、火山学ではこの多項目観測や異なる研究手法の連携が今までも比較的良く実施され、また今後も強く思考されていると思われる。また、観測と素過程やモデル化の研究の連携も密接で多くの成果が出ていると思われる。それは、火山もしくは噴火というターゲットが明瞭で集中しており、かつ様々な現象が複合して生ずるため、様々な観測・研究手法を応用しやすく、また特に物理観測では結果と素過程を一対一対応でモデル化可能な場合が多いためであろう。しかし、このような個別の観測値のモデル化を蓄積することにより、より包括的な火山現象を理解できるようになるのであろうか？

火山現象の数理科学的なモデリングでは、個々の素過程の個別の理解に加えて、素過程の相互作用の非線形性を評価することにより、素過程の重ね合わせだけでは理解できない系の巨視的なふるまいの原因などが明らかにされてきている(小屋口、1995、2008)。系の巨視的なふるまいの原因を理解し挙動を再現できる事が火山を理解することであろう。その実現のためには様々なレベルでの火山の巨視的振る舞いそのものが検証に耐える形で記述されていなければならないが、その記述(評価)を行う事自体が重要な研究である。珪長質マグマの噴火様式が爆発的と非爆発的に二極化する機構のモデル化は火山学上の第一級の成果であるが、モデル化が可能となったのは、火山噴出物の記載・分析に基づいて爆発的と非爆発的噴火を生じたマグマに差はないことが提唱されていたからであろう。観察や観測結果からこのような一般性をもつ火山(活動)像を描き出す事が、それを構成する素過程や支配則等を研究の俎上に載せるために必要である。

観測値や観察結果にはそれぞれの原因はあり、それぞれのモデル化は可能であろう。しかし、それらの原因や関与する素過程の全てが等しく火山や噴火の挙動を理解する上で重要であるわけではない。また、地下でおきているマグマの挙動等は、観測で重要な現象が全て捉えられているとは限らない。むしろ観測で捉えられているのは極一部の現象にすぎないとも考えられる。加えて、多項目観測では必ずしも同一の場所であったり同一の現象が観測対象となっているとは限らないため、個別の観測に基づくモデルの結果のみの比較を行っても共通の火山(活動)像が見えてくる訳ではない。むしろ、ある火山(活動)像の中での、それぞれの観測値やモデルの位置づけを検討することにより、その火山像の妥当性を評価しながら、本質的に重要な現象を抽出するために必要ではなからうか。

地球物理学的観測は単一の物理過程と対応するため、数理的なモデル化や素過程との明瞭な対応が比較的容易である。それに対し、地球化学的観測等のデータは様々な現象の積分として結果である場合が多く、単純な過程でのモデル化が困難で、モデルはマンガ的な表現になる場合も多い。地球物理データが簡潔な数理モデルで解釈可能である事は地球化学から見ると羨望的であるが、簡潔であるが故に他のデータの解釈にも応用可能な火山活動像に直接結びつきにくい場合が多い。反面、地球化学データを説明するために想像された即物的なモデルは、即物的であるが故に、対応する過程を数理モデル化して地球物理学的データとの整合性を評価する事は可能である。このように異なるデータやモデルを共通の場で評価できる事が重要であり、そのためには不正確であっても即物的な火山(活動)像をそれぞれの視点・データから描く事が必要であろう。

キーワード: 火山観測, 素過程, モデル化

Keywords: volcano monitoring, elementary process, modeling

開口割れ目モデルの桜島地盤変動への適用

Application of Tensile Crack Model to the Ground Deformation at Sakurajima Volcano

堀田 耕平^{1*}, 大倉 敬宏¹, 井口 正人²

HOTTA, Kohei^{1*}, OHKURA, Takahiro¹, IGUCHI, Masato²

¹ 京都大学大学院理学研究科, ² 京都大学防災研究所

¹Graduate school of Science, Kyoto Univ., ²DPRI, Kyoto Univ.

桜島火山は、始良カルデラの南端に位置する活火山である。1955年の山頂噴火活発化以降の長期的な地盤変動の特徴は、水準測量およびGPS観測によって明らかにされ、始良カルデラ内部地下約10kmと山頂火口直下約3kmの2つの球状圧力源によってその変動の空間分布が説明されてきた(e.g. 江頭・中村, 1986)。すなわち、噴火の静穏期は前者の膨張による隆起、山頂噴火活動期は両者の収縮による沈降と解釈されてきた。

Hidayati et al. (2007) は、2003～2004年にかけて桜島南西部で発生したVT地震について、始良カルデラ下に推定されるマグマだまりから開口割れ目に沿ってマグマが桜島火山に向かって貫入し、開口割れ目の南西端が開くことによって発生したものと解釈した。同時に、1978～80年の桜島の地盤の沈降は、開口割れ目を始良カルデラ下の茂木ソースに加えることによりうまく説明出来ることを示した。

本研究では、Hidayati et al. (2007) が桜島の地盤変動の膨張期の地震活動から推定した開口割れ目モデルを、2000～2004年の膨張期の地盤変動に適用することを試みた。

今回は、2000～2004年にかけて火山活動研究センター(SVO)で観測されたGPSデータ(9点)に、同期間の国土地理院のGEONETデータ(16点)を加えて解析を行った。解析にはGIPSY OASIS IIを用いた。圧力源の位置等の決定にはグリッドサーチ法を用い、GEONETの観測点0491を固定した水平変位の実測値と理論値の差を用いて最小二乗法で解を決定した。球状圧力源モデルによる地盤変動は茂木モデル(Mogi, 1958)を用い、開口割れ目モデルによる地盤変動はOkadaプログラム(Okada, 1992)を用いて計算した。

まず、単球状圧力源を仮定して解析を行ったところ、膨張する球状圧力源が桜島火山北東沖の深さ約11kmに求まった。体積変化率は $9.2 \times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$ であった。先行研究において、1995～2007年の11年間で $8.0 \times 10^7 \text{m}^3$ の体積変化が見積もられ(井口ほか, 2008)、平均的な体積変化率はおよそ $7.2 \times 10^6 \text{m}^3/\text{年}$ となることから、これよりやや多い程度の値である。

この期間の地盤変動は、とりわけ桜島島内外西側にある観測点においてGEONETの観測点0491を基準とした西方向への変位が大きい傾向にある。そこで、上記の球状圧力源に加えて、圧力源から山頂火口に向かう鉛直な直線状の開口割れ目を加えて解析を行った。球状圧力源の位置と体積変化量は最初の計算で得られた値で固定した。開口割れ目の深さはHidayati et al. (2007) に倣って上端深さ6km、下端深さ9km(幅3km)に固定し、開口割れ目の長さとお開き量を変化させてグリッドサーチを行った。その結果、球状圧力源の南東側から山頂火口の北西側にかけて、長さ2.1km、お開き量約146cmの開口割れ目が得られた。

開口割れ目を加えた結果では、桜島島内外西側にある観測点における西方向への変位のフィッティングは若干改善されているものの、観測値と理論値の間に大きな違いが見られる観測点があった。観測値と理論値の違いの原因としては、モデルの不十分さによるもの(球状圧力源と開口割れ目を同時に仮定する必要があると考えられる。また、割れ目の方位についても吟味する必要がある。)か、いくつかの観測点における固有の地盤変動によるものと考えられる。今後、桜島島外東側にある、観測点も解析に加えて検証を行う。

最後に、GEONETデータを提供して下さった国土地理院に深く感謝いたします。

キーワード: GPS, 地盤変動, 桜島火山, 始良カルデラ, 開口割れ目

Keywords: GPS, ground deformation, Sakurajima volcano, Aira caldera, tensile crack

桜島昭和火口におけるマグマ供給系の流体動力学モデリング Hydrokinetic modeling of magma plumbing system beneath Showa crater of Sakurajima volcano, southwestern Japan

巳波 壮馬^{1*}, 井口 正人², 三ヶ田 均¹, 後藤 忠徳¹, 武川 順一¹

MINAMI, Soma^{1*}, IGUCHI, Masato², MIKADA, Hitoshi¹, GOTO, Tada-nori¹, TAKEKAWA, Junichi¹

¹ 京都大学大学院工学研究科, ² 京都大学防災研究所

¹Graduate School of Engineering, Kyoto University, ²Disa. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.

We numerically simulated hydrokinetic magma supplies in the magma plumbing system beneath an active Showa crater of Sakurajima volcano to find dominant geophysical parameters in the magma accumulating process before an explosive eruption on April 9, 2009. Geodetic observations revealed that a periodic inflation and deflation event had lasted 30 hours before the eruption. Our model consists of shallower gas and deeper magma reservoirs connected by a cylindrical volcanic conduit that had been suggested by the past geophysical observations. A pressure difference between the two reservoirs forces the magma to move from the deeper up to the shallower reservoir. We assumed a constant rate of magma supply to the deeper reservoir as an input to the magma plumbing system and a viscous multiphase magma flow, i.e., crystalized materials, melt, and gas, in the volcanic conduit. The effects of the lateral escape of gas from the conduit, the vesiculation of volatiles in the magma, and the relative motion between gas and solid-liquid are taken into account in the simulation. Our simulations prove that the time-dependent inflation and deflation sequences of the two subsurface reservoirs could be reproduced and that the key parameters such as the radius of the conduit, the magma supply rate and the compressibility of the deep reservoir could be constrained through a least-square error criterion.

Keywords: hydrokinetic simulation, magma plumbing system, transient ground deformation, Sakurajima volcano

マグマだまりにおける過飽和度揺らぎによって支配される噴出量・噴火様式・噴火様式推移のモデル

Model of eruption mass and style and of their temporal change controlled by fluctuation of degree of supersaturation

寅丸 敦志^{1*}

TORAMARU, Atsushi^{1*}

¹九州大学大学院理学研究院地球惑星科学部門

¹Department of Earth and Planetary Science, Kyushu University

The current big issue of volcanology is to clarify factors controlling the magnitude, style and the temporal behavior of eruption. I propose a model for predicting an eruption mass and style, and their temporal change on the basis of the fluctuation of degree of supersaturation in magma chamber.

We assume a square consisting of $n \times n$ (e.g., 512×512) parcels as a magma chamber with the vacant conduit connected to the surface, in which each parcel has a degree of supersaturation of volatile with a Gaussian probability density function (PDF) in space. We think that an eruption is triggered when the volume of parcels with the degree of supersaturation for vesiculation under the lithostatic pressure in magma chamber exceeds the volume equal to that of the vacant volcanic conduit. This triggering condition (triggering supersaturation) links the average supersaturation and variance of PDF each other. So one of them is automatically determined when the other is given. Once an eruption is triggered, the decompression vesiculation is induced by unloading of magma. Parcels contributing to decompression vesiculation have a certain degree of supersaturation, which is less than the triggering supersaturation according to the saturation curve. Parcels satisfying the decompression vesiculation condition are identified as decompression vesiculation parcels. The connected regions of decompression vesiculation parcels are defined as 8 neighbor connection of decompression parcels. We calculate the size distribution of connected regions, and survey the largest connected region which is regarded as unit size when magma ascends to the surface. We divide a square (magma chamber) of $n \times n$ into sub-squares with unit size of largest connected region. As each sub-square has a different fraction (Ψ) of decompression vesiculation parcels, we have a distribution function of decompression vesiculation fraction for the whole magma chamber. A decompression vesiculation fraction Ψ corresponds to a potential enthalpy to drive a sub-square of magma to the surface. A sub-square with higher Ψ generates larger volume of gas phase by decompression at the triggering of eruption, and has a potential to ascend with higher velocity. Thus each sub-square has different potential, according to fraction of decompression vesiculation parcels. We define two thresholds of Ψ . One is explosive threshold Ψ_1 . A sub-square with $\Psi (> \Psi_1)$ can ascend to the surface explosively with high velocity reaching 10 m/s or higher at the surface. The other is effusive threshold Ψ_2 . A sub-square with $\Psi (\Psi_1 > \Psi > \Psi_2)$ ascends up to the surface with mild or very slow ascent velocity less than 10 m/s at the surface. A parcel with $\Psi (< \Psi_1)$ cannot ascend up to the surface and remained in magma chamber. In this model, we can define explosive mass and effusive mass and the temporal change of eruption intensity depending on Ψ of each sub-square. We carried out a Monte Carlo simulation on the basis of the above-mentioned idea. As a result, if PDF of the degree of supersaturation has higher average or the magma chamber is relatively homogeneous, then the eruption is almost explosive and most extent of magma is evacuated, like a caldera-forming eruption. Decreasing the average supersaturation and increasing the variance of PDF, the eruption shift to an explosive eruption followed by an effusive eruption and to an eruption which only produce an effusive flow of magma such as lava flow. This transition of eruption styles from explosive to effusive and the relation to the erupted mass can account for commonly recognized transition between eruption styles in nature.

キーワード: 減圧発泡, 噴出量, 噴火様式, 噴火推移, 過飽和度

Keywords: decompression vesiculation, erupted mass, eruption style, temporal change of eruption, degree of supersaturation

せん断変形が起こす脱ガスに関するスケーリング：気泡を含むマグマは断続的に上昇すると効率的に脱ガスします

An empirical scaling of shear-induced outgassing: Intermittent magma ascent causes effective outgassing

並木 敦子^{1*}

NAMIKI, Atsuko^{1*}

¹ 東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻

¹ Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo

Outgassing, which changes the distribution of volcanic gases in magmas, is one of the most important processes to determine the eruption styles. Shear deformation of ascending bubbly magmas at the vicinity of the volcanic conduit wall has been considered as an efficient mechanism of outgassing. On the other hand, seismological observations of volcanic eruptions reveal the long-period (LP) earthquakes suggesting that there exists a large void space in the conduit. However both, the quantitative features of shear-induced outgassing and a mechanism to make a large void space, has still remain unknown.

Here I perform a series of model experiments simulating the shear deformation of bubbly magma ascending in a volcanic conduit. Syrup foam including CO₂ gas as an analogue of bubbly magma is deformed by using a timing belt. When the imposed shear strain is large enough, the height of the foam decreases indicating that outgassing occurs. Experiments also show that shear localization of syrup foam causes outgassing by making large bubbles or a crack-like void space, likely a LP earthquake source. Measured CO₂ concentration above the foam increases as an evidence that the gas is came from the inside bubbles. When there is an impermeable layer at the top of the foam, the gas accumulates beneath that layer.

There is a critical strain, γ , above which outgassing occurs depending on the Capillary number, Ca , $\gamma > 1$ for $Ca < 1$ and $\gamma > Ca^{-1}$ for $Ca > 1$. The thickening rate of the region in which outgassing occurs is described as a function of $\gamma^{-0.54} Ca^{1.2}$. Outgassing occurs efficiently at the very beginning of the deformation, suggesting that intermittent magma ascent causes effective outgassing such that the eruption style becomes effusive. This hypothesis is consistent with the fact that cyclic activity has been observed during effusive dome eruptions.

キーワード: 脱ガス, せん断変形, マグマ, 気泡, キャピラリー数

Keywords: outgassing, shear deformation, magma, bubble, Capillary number

ばね加圧装置を用いた流紋岩質ガラスの破断面ヒーリング機構の実験的説明 An experimental study on the mechanism of fracture healing in a rhyolitic glass using a spring pressure device

吉村 俊平^{1*}

YOSHIMURA, Shumpei^{1*}

¹ 北海道大学・理・自然史科学専攻

¹Department of Natural History Sciences, Hokkaido University

< 研究背景 >

珪長質マグマが流動する時、剪断応力が最大となる母岩近傍ではメルトの脆性破壊が起こり、マグマ内部に破断面ネットワークが形成される。このネットワークはマグマの開放系脱ガスを促進し、噴火ダイナミクスや火山岩組織の発達を支配するほか (Gonnermann&Manga, 2003nature; Fink, 1983GSA Spec.Pap.)、火山性地震を発生させるとも考えられている (e.g., Tuffen et al., 2003geology)。一方、破断面は次第に焼結し、ヒーリングするため、ガス通路としての機能を次第に失ってゆく。同時に、破壊面が回復することでマグマは強度を取り戻し、新たに破壊できる状態に戻る。したがって、マグマの脱ガス効率や継続時間、火山性地震の周期性を理解するには、ヒーリングのメカニズムを定量的に解明しなければならない。

この考えに基づき、Yoshimura and Nakamura (2010 JGR) では、ほぼ一定の圧力で流紋岩質メルトのヒーリング実験を行い、ヒーリング時間の温度依存性を調べるとともに、その素過程を議論した。しかし、深度(圧力)とともにヒーリング時間がどのように変化するかは明らかにされていない。そこで本研究では制御された圧力下で流紋岩質ガラスの破断面ヒーリング実験を行い、その時間を測定した。

< 実験方法 >

本研究では、火道最上部～溶岩内部の圧力(5～100bar)を精密に制御できるばね加圧装置を開発し、実験に使用した。試料を一軸圧縮する構造で、電気炉外に置かれたばねの弾性力が金属ピストンを介して試料に加わるようになっている。マグネシア容器に流紋岩質黒曜石の円柱(初期含水量 0.65wt%)を2本導入し、5～100気圧の様々な圧力をかけながら920℃で3～6時間加熱した。円柱底面は低速度カッターによる切断面であるため、一見平らだが、 10^{-6} m程度の凹凸が細かく形成されている。この底面同士の接触部分がマグマ破断面を模擬している。実験中、試料は開放系環境にあるため、実験圧力にかかわらず、メルト表面から脱水する。一方、接触部分では、ヒーリングしたあとは表面が失われ、脱水が停止し、含水量分布は均質化してゆく。この性質を利用して、含水量プロファイルと水の拡散脱水モデルと比較することで脱水停止時刻を決定し、これをヒーリング時間とした。

< 実験結果 >

すべての試料で接合面は焼結し、2つの円柱は一体化していた。ヒーリング時間には、2種類の圧力依存性が観察された。すなわち、30bar以上の高圧領域では、加圧応力の増加とともにヒーリング時間は単調減少し、30から100barまで増圧させると50分から4分まで低下した。一方、それより低圧では8barでも42分であり、明瞭な圧力依存性は確認されなかった。

< 考察 >

圧力依存性に2種類のモードがある理由は、ガラスの粘性流動の駆動力が30bar程度で切り替わるためだと考えられる。ガラスのヒーリングには(1)粘性流動によって破断面の凹凸が平滑化し、原子間距離のレベルまで近づいたあと、(2)界面に化学結合が作られるという、段階的な過程が必要である(2)は構造緩和時間程度の短時間のうちに完了するのに対し(1)は長時間を要し、ヒーリング時間の大部分を占める過程である。この粘性流動は、表面張力および加圧応力によって駆動されている。もし、加圧応力>表面張力の圧力であれば、加圧応力が支配的となり、ヒーリング時間は加圧応力に依存して低下すると考えられるが、逆のときは、表面張力が支配的となり、ヒーリング時間は圧力に関係なく、一定と予想される。本実験の模擬破断面の凹凸のスケールは $\sim 10^{-6}$ m、表面張力は $\sim 10^{-1}$ N/mであるから (Bagdassarov et al., 2007AmMin)、表面張力による圧力は数10barと計算される (Cassidy&Gjostein, 1970JAmCeramSoc)。すなわち数10barで駆動力の切り替わりが起こることになり、本実験では、それがちょうど30bar付近であったと考えられる。

< 天然マグマの破断面ヒーリング >

実際のマグマ破断面の凹凸のスケールを本実験と同じ 10^{-6} mと仮定すると、2つの駆動力の切り替わりは30気圧程度(13m)付近で起こることになる。それよりも浅い溶岩流内部などでは、深さに関係なくヒーリング時間はほぼ一定で、かつ長時間脱ガスが継続すると考えられるが、それ以深では深度に応じて短くなる。火道内を上昇するマグマが効

Japan Geoscience Union Meeting 2012

(May 20-25 2012 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2012. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SVC54-06

会場:301B

時間:5月20日 12:00-12:15

率良く脱ガスするには、多数の破断面が発生・ヒーリングを繰り返す必要があるかもしれない。また、火山性地震の発生周期は、マグマ上昇とともに長くなることが予想される。

キーワード: 破断面ヒーリング, マグマ, 流紋岩質ガラス

Keywords: fracture healing, magma, rhyolitic glass

気象レーダによる火山噴火監視の可能性 - 2011年1月～3月の霧島新燃岳の噴火事例解析結果 - Potential Ability of Weather Radar for Volcanic Ash Detection

真木 雅之^{1*}, 前坂 剛¹, 小園 誠史¹, 長井 雅史¹, 古川 竜太², 中田 節也³, 越田 智喜⁴, 武中英好⁴

MAKI, Masayuki^{1*}, MAESAKA, Takeshi¹, KOZONO, Tomofumi¹, NAGAI, Masashi¹, FURUKAWA, Ryuta², NAKADA, Setsuya³, Tomoki KOSHIDA⁴, Hideyoshi TAKENAKA⁴

¹ 防災科学技術研究所, ² 産業技術総合研究所, ³ 東京大学地震研究所, ⁴ (株)いであ

¹National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ²National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ³Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, ⁴IDEA Consultants, Inc.

2011年1月～3月の間に起きた霧島新燃岳の顕著な噴火事例計27事例について、国土交通省河川局の国見山Cバンドレーダおよび釈迦岳Cバンドレーダのデータを収集し、噴煙検出期間、最大反射強度、積算反射強度、反射因子差を求めた。解析結果から、気象レーダは顕著な火山噴火現象の監視に有効であることが確かめられた。1月26日-27日の噴火事例のレーダデータと地上の降灰分布の実測値の比較から「反射強度-降灰量」関係式を提案した。一方、次のようなケースではレーダは噴火を検出できなかった。噴出粒子が小さくレーダの検出可能な反射強度以下の場合、噴火が小規模で噴煙高度がレーダビーム観測高度以下の場合、噴煙粒子が降水粒子と混在する降雨時の場合などである。偏波レーダパラメータの一つである反射因子差は、火口付近では空間的にも時間的にもランダムに変動したが、風下側では有意な傾向が見られた。偏波レーダは降水と噴煙を区別できる可能性があり、噴火時の他の偏波パラメータと検証用データの取得および火山灰の散乱特性の理解は今後の課題である。

画像解析を用いた新燃岳における噴火規模の即時的な推定の試み Feasibility study of immediate eruption scale estimation by using image analysis

高木 朗充^{1*}, 新堀 敏基¹, 山本 哲也¹, 白土 正明², 平 祐太郎², 加藤 幸司³, 福井 敬一⁴

TAKAGI, Akimichi^{1*}, SHIMBORI, Toshiki¹, YAMAMOTO, Tetsuya¹, SHIRATO, Shomei², TAIRA, Yutaro², KATO, Koji³, FUKUI, Keiichi⁴

¹ 気象研究所, ² 気象庁地震火山部, ³ 福岡管区気象台, ⁴ 気象庁地磁気観測所

¹Meteorological Research Institute, ²Seismological and Volcanological Department, Japan Meteorological Agency, ³Fukuoka District Meteorological Observatory, ⁴Kakioka Magnetic Observatory

噴火現象を検知し、噴火様式、噴火規模、噴出物の到達範囲、及びその量を予測あるいはリアルタイムで実況把握することは、火山災害を軽減する上で重要である。とりわけ噴火規模を噴火の初期段階で推定することが可能になれば、その後の防災行動において有効な情報となる。

2011年1月から始まった霧島山新燃岳の噴火は、準プリニー式噴火を含む、多量の噴出物を放出する噴火活動となった。この噴火によって得られた、噴火映像、地震動、空振データ等を用い、噴火規模を即時的に推定することが可能かどうかの調査を開始したので、途中経過を報告する。

気象庁監視カメラで撮影された新燃岳の噴火画像に対して、粒子画像流速測定法 (Takimoto, 2011) による解析 (PIV解析) を用い、噴煙の噴出速度を求めた。風が弱く解析条件がよい2011年3月13日の噴火について適用した。30分程度継続した主要な噴火期間において、浮力の影響が小さいと考えられる火口直上300mまでの噴煙の速度分布から噴出物の見かけの運動エネルギーを算出した (密度は仮に1とした)。その時間変化について、地震及び空振の振幅自乗和の時間変化と比較したところ、空振の時間変化とは比較的相関が高いことがわかった。

また、PIV解析から見かけの噴出総量を見積もったところ、 $7 \times 10^8 \text{m}^3$ であった。これは火山砕屑物の他に、火山ガスや噴煙の周囲から取り込む大気も含む見かけの量である。一方、この噴火の噴出量は降灰調査により約100万トンと推定されており (地震研究所, 2011)、体積量では $0.5 \sim 1 \times 10^6 \text{m}^3$ に相当する。以上から、PIV解析から見積もったこの噴火の見かけの総噴出量は、実際の火山砕屑物の噴出量の700~1400倍に相当することがわかる。

PIV解析による見かけの運動エネルギーの時間推移と空振の自乗振幅の時間推移には相関があり、両者の関係を決定することができれば、空振のモニタリングにより、噴出率をモニタリングできる可能性があることがわかった。

この調査は現時点では1カ所のカメラと1カ所の空振計による調査結果であるが、それ以外の観測点、この噴火以外の事例、新燃岳以外の火山での事例等を今後調査する予定である。

キーワード: 噴火規模, 新燃岳, PIV解析, 空振

Keywords: eruption scale, Shinmoedake, PIV analysis, infrasound

多流体近似に基づく噴煙柱のラージエディシミュレーション - 噴煙柱発達に及ぼす乱流モデルの影響 -

Large-eddy simulation of eruption column based on multi-fluid approximation - Effects of turbulent model on development

須藤 仁^{1*}, 服部 康男¹, 土志田 潔¹

SUTO, Hitoshi^{1*}, HATTORI, Yasuo¹, TOSHIDA, Kiyoshi¹

¹ (財) 電力中央研究所

¹ Central Research Institute of Electric Power Industry

爆発的な噴火に伴う噴煙の運動において、乱流は、その運動様式（噴煙柱、火砕流等）を決定づける重要な要素の一つである。従来の定常一次元噴煙柱モデルは、乱流の効果を理論式における定数として取り扱うが、火口に近い領域の評価や噴煙崩壊条件の推定において、十分な精度を有していないとの指摘もある。近年、その効果をより直接的に取り扱う非定常三次元噴煙柱モデルの開発が進んでいる（例えば、Neri et al. 2007, Suzuki and Koyaguchi 2010）。しかし、気体と火砕物に対する乱流のモデリングについては不明な点が残されている。本報では、多流体近似に基づく非定常三次元の噴煙柱解析コードを新たに構築する。二種類の乱流モデル（サブモデル）を用いた解析結果と定常一次元モデルによる解析結果との対比を通じて、乱流モデルの影響を議論する。

本コードでは、多様な噴煙柱形状への適用性、様々な大きさの火砕物の運動の再現性に優れた Neri et al. (2007) のモデルの概念を採用する。また、オープンソースコード FrontFlow/red (Ver.3.0) を利用し、乱流の表現としてサブグリッドスケール (SGS) モデルに基づくラージエディシミュレーション (LES) を採用する。気体成分と様々な粒径の火砕物を複数の相に分類して、それぞれの相に対する質量保存式、運動量保存式、エネルギー保存式を基礎方程式とする。SGS モデルは、基礎方程式内の応力項、拡散項のサブモデル式の一部となる。気体相の SGS モデルとしては、一般に広く用いられている Smagorinsky モデルおよび、SGS における抗力の影響を加味した Yuu モデル (Yuu et al. 2001)、粒子相の SGS モデルとしては、粒子の緩和時間と気流の渦の持続時間との関係を考慮した Hinze (1975) の提案式を用いる。方程式の空間離散化には、粒子相の各保存式の移流項に三次精度 TVD スキーム、その他に二次精度中心差分法を用いる。時間積分には、オイラー陰解法と三次精度 Adams-Moulton 法を組み合わせた fractional step 法を適用する。

初めに、単純体系（単相の浮カブルーム、固気混相噴流）での既往の実験データとの対比により、本コードの妥当性を部分的に評価した。その結果、本解析値は、浮カブルームの相似則を満足し、単相流の実験値と良く対応すること、気体相と粒子相の速度差に起因する速度の変化や粒子相の乱流強度等についても実験値と良く対応すること、規模の小さな室内実験体系において SGS モデルの効果は小さいことを確認した。次に、プリニー式噴火の噴煙柱を対象に、定常一次元モデルの結果 (Woods 1988) との対比を行った。その結果、噴出速度に応じた噴煙柱の形状変化に対して、一次元モデルと本解析は良く対応した。さらに、SGS モデルの選択により噴煙柱高さ等の特性に変化が生じたことから、実規模の噴煙柱解析においては、SGS モデルが結果に無視できない影響を及ぼすことが示唆された。

キーワード: ラージエディシミュレーション, 多流体近似, 噴煙柱, 乱流モデル

Keywords: large-eddy simulation, multi-fluid approximation, eruption column, turbulent model

可視分光顕微鏡を用いた珪酸塩ガラス中の鉄の二価・三価比の局所分析：マグマ・マントルの酸化還元状態の理解へ向けて Microanalysis of ferric-ferrous ratio of silicate glasses by visible microspectroscopy

奥村 聡^{1*}, 山野井勇太²

OKUMURA, Satoshi^{1*}, Yuta Yamanoi²

¹ 東北大学地学専攻地球惑星物質科学講座, ² コニカミノルタセンシング株式会社

¹Dept. Earth Science, Tohoku Univ., ²Konica Minolta Sensing, Inc.

Ferric-ferrous ratio of magma reflects source mantle and evolution of redox state during magma ascent to earth surface (e.g., Kelley and Cottrell, 2009 Science; Burgisser and Scaillet, 2007 Nature). A direct method to determine the redox state is to investigate the ferric-ferrous ratio of quenched glasses in volcanic rocks. The synchrotron micro XANES technique, which has high spatial resolution down to 10 μm (Delaney et al., 1998 Geology), has been applied to the measurement of ferric-ferrous ratio of volcanic glasses, but the major disadvantage of this method is the limited number of facilities. Here, we develop a visible microspectroscopy to measure ferric-ferrous ratio of silicate glasses in in-house laboratory and report preliminary results.

The visible microspectroscopy consists of a microscope, a halogen lamp unit, and a monochromator. In this system, the intensity of the monochromatic light through a sample thin section is measured using a digital camera with the raw mode. Because we use the monochromatic light and digital camera, two dimensional data can be obtained, which is expected to have high spatial resolution.

We synthesized standard glasses with different chemical compositions (JA3 and JB3) and different ferric-ferrous ratios to calibrate the relationship between ferric-ferrous ratio of the glasses and the transmittance of visible lights. The glasses were prepared by melting powder samples using a Pt wire-loop method, at a temperature of 1300 deg C under $\text{CO}_2\text{-H}_2$ mixed gas flow. On the basis of the CO_2/H_2 ratio, the oxygen fugacity was controlled to be $\Delta\text{NNO}-1$ to $\Delta\text{NNO}+3$, and the ferric-ferrous ratio was calculated from the mixed CO_2/H_2 ratio. The quenched glass was doubly polished to thin sections with thicknesses of approximately 60 and 110 μm . The visible light image of the glasses was obtained using some different wavelengths (420, 440, and 520 nm). The greyscale intensity in 8 bit was measured in different points in the glass and normalized by the background intensity. For the analytical condition of this study, the transmittance of 420 nm shows a good correlation with the ferric-ferrous ratio without intensity saturation. Hence, there is a possibility that the ferric-ferrous ratio and redox state of basaltic to andesitic glasses can be determined using the visible microspectroscopy.

We will apply the method established in this study to melt inclusion in pyroclasts to investigate the change in redox state of magma before volcanic eruptions and to examine the relationship between redox state of magma and the injection of fluid into magma chamber which has been recently proposed in many volcanoes (e.g., Blundy et al., 2010 EPSL).

キーワード: 珪酸塩ガラス, 鉄の二価・三価, 可視分光法, マグマ, マントル, 酸化還元

Keywords: silicate glass, ferric-ferrous ratio, visible spectroscopy, magma, mantle, redox state

気泡壁から測る気泡数密度 Bubble number density (BND) from bubble wall

板倉 統^{1*}

ITAKURA, Matomu^{1*}

¹ 神戸大学理学部地球惑星科学科

¹ Faculty of Science, Kobe University

One of the dynamics of volcanic eruption is the expansion of magma volume resulting from its bubbling. Under high pressure condition, volatile such as water and CO₂ melt in the magma. Decompression caused by uprise of magma leads vaporization of the volatile contents which invoke bubble nucleation and expand into bubbles. Bubble number density (BND) is the number of foregoing nucleation per unit bulk volume. BND is proportional to the (3/2) power of the decompression rate as demonstrated by Toramaru(2006), and it may give significant information of the erupting magma in the chamber and the conduit, where observation is difficult.

To calculate BND, various methods have been developed so far. For instance, Toramaru(1990) calculates BND from the distribution of the length of the lines which cross bubbles, Sahagian and Proussevich(1998) calculates it from the distribution of the cross-section size of vesicles. These traditional methods concentrate on the vesicles, thus it is difficult to calculate BND from the fragmented sample such as volcanic ash or volcanic glass. Volcanic ash, however, constitutes more than half of the volcanic ejecta from a pyroclastic eruption, therefore it is also important to gain the information from fragmented samples or bubble wall. This study proposes two methods to calculate BND from bubble wall thickness.

Regarding bubble wall as a *shell covering the vesicle* and assuming bubble cell model proposed by Zhang(1999), the bubble number density N_V is calculated from following formula: $N_V = 6(1-P)^{1/3} / \pi(1-P)d^3$, where P is the porosity, π is the circular constant and d is the mean thickness of the bubble wall (Oki et al., 2004). On another front, presuming bubble wall to be a *board nipped by the vesicle* and assuming a bubble as a sphere, N_V is: $N_V = 16(1-P)^2 / (9\pi P^2 l^3)$, where l is the mean free path regarding the bubble wall as space and the vesicles as obstacles.

To verify these methods, BNDs are estimated by both these methods and traditional methods from cross-section images of the same pumices. These pumices have various quality: basaltic or rhyolitic material, high or low porosity, and circular or flattened cross-section shape. Comparing these BNDs, they are within a range from 10^{10} to 10^{17} and show a good correspondence. Thus BND can be calculated from bubble wall.

Keywords: bubble number density, bubble wall

古地磁気測定により推定される大雪山、御鉢平火砕流の堆積期間

The deposition period of Ohachidaira pyroclastic flow of the Taisetsu volcano estimated from the paleomagnetic study

安田 裕紀^{1*}, 佐藤 鋭一², 和田 恵治³, 鈴木 桂子¹

YASUDA, Yuki^{1*}, SATO, Eiichi², WADA, Keiji³, SUZUKI-KAMATA, Keiko¹

¹ 神戸大院理, ² 神戸大, ³ 北海道教育大旭川

¹Graduate School of Science, Kobe Univ., ²Kobe Univ., ³Hokkaido Univ. of Education

大雪山は北海道の中央部に位置し、その山頂部には直径約 2km の御鉢平カルデラがある。御鉢平カルデラは約 3 万年前におもに火砕流（以下、御鉢平火砕流と呼ぶ）の噴出により形成された（勝井ほか, 1979）。御鉢平火砕流は谷地形や凹地を埋め、カルデラの北東から北西、および南西に広く分布し火砕流台地を形成している。また、同火砕流は本質物質に軽石、スコリア、縞状軽石が含まれ、軽石中の斑晶鋳物量比および軽石のガラスの化学組成によって少なくとも 2 種類に分類されている（若佐ほか, 2006；佐藤・和田, 2011）。

従来の研究ではその活動について 2 つの異なる見解がある。勝井・伊藤（1976）および若佐ほか（2005・2006）は御鉢平火砕流が短期間に一連の噴火によって堆積したと推定している。一方、目次（1985 MS）では火砕流堆積物中に侵食ギャップやローム層が見られること、佐藤・和田（2011）では火砕流堆積物中に同質の溶結凝灰岩が外来岩片として含まれることを根拠に、御鉢平火砕流は短期間ではなくある期間を置いて堆積したと解釈している。そこで、本研究では山麓に分布する御鉢平火砕流堆積物の古地磁気測定により、同火砕流の堆積期間の推定を試みた。

古地磁気測定によって得られる熱残留磁化は、岩石の熱履歴や堆積当時の古地磁気方位を推定するのに役立つ。残留磁化測定用の試料は火砕流堆積物が溶結を呈する 6 地点では溶結部のマトリックス部分を、非溶結を呈する 4 地点ではおもに本質物質をそれぞれ約 10 個ずつ計 10 地点で採取し、実験室にて整形し段階熱消磁実験を行った。その結果、残留磁化はほとんどの試料が単成分を示し、その方位は各地点でよく揃っており堆積当時の古地磁気方位を示していると考えられる。また、古地磁気方位は地点によって正帯磁で東偏（4 地点）と正帯磁で西偏（6 地点）の異なる 2 つの方向に分かれた。その 2 方向は伏角では差がほとんどないが、偏角で約 45° の差がある。ただし、正帯磁で東偏の 1 地点は他の 3 地点と平均方向の 95% 信頼角が重ならず、伏角が約 15° ずれている。兵頭・峯本（1996）で示される西南日本の過去 1.1 万年間の地磁気永年変化標準曲線によると、偏角が 45° ずれるためには変化の遅い時期では数千年、速い時期では数百年かかることが示されている。また、先行研究で示される 2 種類の火砕流は正帯磁で東偏、正帯磁で西偏の 2 方向にそれぞれ対応する。

以上より、御鉢平火砕流は短期間ではなく少なくとも数百年以上の期間で、休止期を挟みながら堆積したと推定される。また、その間に 2 種類の火砕流イベントが期間を置いて発生していたことが明かとなった。

キーワード: 古地磁気, 火砕流, 堆積期間, 地磁気永年変化, カルデラ, 大雪山

Keywords: paleomagnetism, pyroclastic flow, deposition period, geomagnetic secular variation, caldera, Taisetsu volcano

表面張力によるメルトフォーム組織緩和実験 Experimental study on the textural relaxation of melt foam

大槻 静香^{1*}, 中村 美千彦¹
OTSUKI, Shizuka^{1*}, NAKAMURA, Michihiko¹

¹ 東北大・理・地学専攻

¹Dept. Earth Sci., Tohoku Univ.

Vesiculation and outgassing of ascending magma control the style of volcanic eruptions. In a series of Vulcanian activity, dense lavas are formed in the volcanic craters in the interval between explosions. It is believed that this dense, less-permeable lava caps play a key role to accumulate overpressure within shallow conduits. Detailed mechanism of the lava cap formation is, however, poorly understood. The decrease of permeability in the foamed magma has generally been attributed to the compaction associated with permeable-flow outgassing (Westrich and Eichelberger, 1994, Okumura et al., 2010). The surface tension of melt is a primary force for textural development of vesiculated magmas such as bubble coalescence and textural relaxation (e.g., Saar and Manga, 1999), but its effect on the microstructure, density and permeability of magmas is not well constrained.

We carried out heating experiments of an andesitic pumice (Taisho eruption of Sakurajima volcano in 1914) to examine the process of surface tension-driven foam collapse. Its bulk water content is ca. 0.5 wt.%. We have conducted the experiments in two pressure conditions. One is low water vapor pressure experiment ($0 \text{ atm} < P_{\text{total}} = P_{\text{O}_2}$, $\text{NNO} < 1 \text{ atm}$, LVP), and the other is higher ($P_{\text{total}} = P_{\text{H}_2\text{O}} = 20, 40 \text{ and } 60 \text{ atm}$; HVP). The experimental temperature for the LVPs and HVPs were 400 to 1000 and 1000 deg.C, respectively. The run duration ranges from 0.5 to 32 hours. After the runs, run products were observed with scanning electron microscope (SEM). The geometry of bubble such as vesicularity, circularity, connectivity and bubble size distribution were analyzed on the BSE images. In the LVPs and HVPs at 1000 deg. C, the vesicularity and the connectivity decreased and the circularity increased. At $< 800 \text{ deg. C}$, however, no significant densification was observed. The melt viscosity was calculated to be 10^6 , 10^8 and 10^{11} Pa s for the HVPs, LVPs at 1000 and 800 deg. C, respectively. The surface tension was calculated to be ca. 235 m N/m for all the experimental conditions. It is inferred that in the Vulcanian eruptions, the microstructure of the foamed melt quickly relax due to the surface tension of melt, resulting in the formation of impermeable lava caps in the crater.

キーワード: メルトフォーム, 表面張力, 形状緩和, 浸透性, 粘性

Keywords: melt foam, surface tension, textural relaxation, permeability, viscosity

マグマ模擬材料を用いた固体/流体遷移領域での破砕過程の観察

Observation of the fragmentation process of the analogous magma in the solid/liquid transition regime

岡部 渉¹, 志田 司^{1*}, 亀田 正治¹, 市原 美恵²

OKABE, Wataru¹, SHIDA, Tsukasa^{1*}, KAMEDA, Masaharu¹, ICHIHARA, Mie²

¹ 東京農工大学 工学府 機械システム工学専攻, ² 東京大学地震研究所

¹Department of Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, ²Earthquake Research Institute, University of Tokyo

マグマの破砕は爆発的噴火のトリガとされ、火山噴火様式を決めるカギとなる現象である。我々は破砕発生メカニズムを調査するために、マグマの模擬材料（酸素気泡を混入した水あめ）を急減圧して破砕させる室内実験を行ってきた。その実験における破砕発生の有無を、「脆性度」(Ichihara and Rubin, 2010) を用いて評価した結果、以下のことが分かっている。「脆性破砕」は加えられる差応力の大小に関わらず、脆性度が 0.9 から 1.0 の間で起こっている。そして、脆性度が 0.9 よりも小さいとき、臨界差応力程度の差応力が加えられた試料は破砕を起こさず、流体的に膨張する。一方、臨界差応力よりも十分大きな差応力（1.5 倍程度以上）を加えられた試料は「遅れ破砕」を起こす。本研究では、この「遅れ破砕」に焦点を当てる。

「遅れ破砕」は、固体/液体遷移の緩和時間、粘性率を剛性率で除したもので、よりも後に発生する破壊を示す。さらに、気泡を含んだマグマの減圧では、粘性流動による気泡膨張によってマグマに加わる応力が緩和される。この粘性流体中における気泡膨張の特性時間は、初期気泡内圧力、粘性率、そしてポイド率の関数である。「遅れ破砕」の発生時刻を粘性流体中の気泡膨張特性時間を用いて整理した。その結果、「遅れ破砕」の発生時刻は、すべてこの特性時間より小さいことがわかった。ゆえに、「遅れ破砕」は膨張した気泡同士の間隔によってマグマを分裂させる液体的破砕ではなく、差応力によってマグマを破壊する固体的な破砕（脆性的破砕）である。

この脆性的破砕が、脆性度が小さいところで発生している原因として、(1) 急減圧時の試料冷却による粘度上昇、(2) 試料に気泡を混入することで生じるクラックの影響が挙げられる。したがって、それぞれの影響を調査するための実験を行なった。まず、試料表面と試料付近に設置された温度センサ（K 型熱電対）を用いて、急減圧による試料冷却の影響を調べた。装置内のガスの温度は、100 ms 後には数十度低下した。一方で、試料表面温度は破砕が起こるタイムスケール（100ms 程度以内）において、温度低下は見られなかった。したがって、急減圧による試料冷却の影響はないことが分かる。

次に、ポイド率（気泡混入量）が大きく異なる試料を作成し、同程度の脆性度、最大差応力において実験を行なった。脆性度が同じで、ポイド率が大きく異なる場合について比較すると、ポイド率が高くなると破砕が発生する傾向が見られる。また、ポイド率の大きな試料について、加圧する直前に断面を観察すると、内部の気泡同士が連結している様子がみられ、この状態で加圧することで気泡形状は複雑になると推定される。急減圧時に試料に加わる差応力が臨界差応力よりも十分に大きく、かつ高ポイド率によって応力が集中する部分があると、試料内部で気泡連結によるクラックが成長するだろう。このクラックが表面に到達し、内部から高圧ガスが吹き出すことにより、二次的な急減圧が発生し、破砕が誘発されることが考えられる。

減圧イベントから時間遅れを持って破砕が発生する現象は、実際の火山噴火にも見られ、本研究の観察結果は、これらの実現象に重要な示唆をあたえるだろう。

キーワード: 破砕, 粘弾性, 模擬実験, 脆性度

Keywords: fragmentation, viscoelasticity, analogous experiment, brittleness

湖水爆発のアナログ実験 Analog experiment for limnic eruption

大場 武^{1*}, 片桐輝久¹
OHBA, Takeshi^{1*}, Teruhisa Katagiri¹

¹ 東海大学理学部化学科

¹Dep. Chem. School. Sci.

1. 序

1980年代の半ばにカメルーンのニオス湖とマヌーン湖で起きたCO₂ガスの突発的な放出(=湖水爆発)は約1800名の犠牲者をもたらした。湖水爆発の直接的な原因は、湖水に蓄積したマグマ起源のCO₂であった(Kusakabe et al., 1989; Kling et al., 1989; Sigvaldason, 1989; Evans, et al., 1994)。この蓄積は、湖底でCO₂に富む温泉水が湧出し、湖水の密度成層のため上昇が阻害されるために起きる。湖水爆発の引き金については諸説がある。そもそも引き金など必要なく、マグマ性CO₂の継続的供給により湖のCO₂濃度が十分に高まればわずかなきっかけで爆発的脱ガスは起きるとする考え方がある(Kusakabe et al., 2000)。別の仮説として、災害直前に冷たい雨水が湖に大量に流入し、冷たい水塊があたかも地球のプレートのように深層に沈み込んだ結果、深部の湖水が持ち上げられ、圧力低下によりCO₂が過飽和になり連鎖的・爆発的脱ガスを引き起こしたとする説がある(Giggenbach 1990)。研究の初期段階では湖底で火山噴火が発生したとする説(Tazieff, 1989)も唱えられたが、現在ではその可能性は無いとされている。本研究では、湖水爆発のトリガーを解明するためにアナログ実験に着手した。今回は予察的な実験結果について報告する。

2. 実験

A (CO₂溶解・脱ガス) 内径150mm, 高さ300mmの気密円筒形透明アクリル樹脂製の容器内に2Lの純水を入れpH指示薬(メチルレッド)を添加した。ヘッドスペースを0.2MPaの純CO₂ガスで満たした。CO₂ガスが水と溶解平衡に達したことを溶液の色の変化で確認した後に、内圧を約10秒以内に0.1MPaの大気圧まで開放し、溶存CO₂ガスの脱ガス状況を観察した。

B (化学反応によるCO₂の発生) 内径94mm 高さ310mmの円筒形透明アクリル樹脂製のシリンダーを用意した。このシリンダーは下から34mmの所で上下に分割することが可能で、上下を薄いプラスチックのシートで隔離できる。上下に異なる種類の水溶液を入れ、シートを引き抜くことにより、溶液を接触させる。下部の内容積は235mlである。容器の上下に1M HCl水溶液, 0.2M Na₂CO₃水溶液を入れて中和反応でCO₂ガスを発生させた。

3. 結果および考察

実験Aでは、CO₂ガスは気泡となり発生がみられたが、その速度は遅く、泡は個別に水面に向かい上昇するだけであり、湖水爆発に類似するような現象を発生させることはできなかった。

実験Bでは下層にHCl水溶液を入れプラスチックシートで被い、上下を接続した後に、上層にNa₂CO₃水溶液500mlを入れ、プラスチックシートを素早く引き抜き反応を起こさせた。上下の水溶液はよく混合し、2秒程度以内に大量にCO₂ガスが発生した。発生したCO₂ガスは水を持ち上げ、泡と水溶液の混相流体の上端は容器の上端付近まで達した。次に下層にNa₂CO₃水溶液, 上層にHCl水溶液500mlを入れ反応させたが、上下の水溶液はは全体的には混合せず、界面付近でわずかに混合し、発生したCO₂の泡が溶液の流動を引き起こすことはなかった。

実験Aの結果は、CO₂の泡の発生と成長はある程度時間を要する過程であり、CO₂の過飽和度が低い場合は、発生した泡は個別に上昇するだけであり、溶液全体の流動を引き起こすことはできないことを意味している。また、減圧の速度も急激な泡の発生には必要であることを暗示する。

実験Bでは溶液の位置により異なる結果が得られたが、溶液の密度が結果の相違に関係していると考えられる。実際に比重ピンを用いてHCl, Na₂CO₃溶液の密度を測定したところ、それぞれ1.018, 1.028 g/cm³であり、上層に比重の高いNa₂CO₃溶液をいれた場合、比重の低い下層に溶液が降下することにより効率的な混合が発生し、短時間でCO₂ガスを発生させ、湖水爆発に類似した現象が発生したと考えられる。

キーワード: 湖水爆発, アナログ, CO₂

Keywords: Limnic eruption, Analog, CO₂

噴火の時間間隔を制御する要因：マグマ供給系のモデルによる解析

What controls time intervals between volcanic eruptions: Analysis using a magma plumbing model

井田 喜明^{1*}, 及川 純¹

IDA, Yoshiaki^{1*}, OIKAWA, Jun¹

¹ アドバンスソフト株式会社, ² 東京大学地震研究所

¹ Advance Soft Co., ² Earthquake Res. Inst., Univ. of Tokyo

噴火がどんな時間間隔で発生するかは、噴火機構の考察にとって、また噴火予知にとって基本的な問題である。噴火はほぼ一定の時間間隔で周期的に発生することがある。例えば、最近 100 年程度の期間を見ると、有珠山では 30 年前後、三宅島では 20 年前後の間隔で噴火が繰り返されて、それが次の噴火の時期を知る目安になってきた。しかし、このふたつの火山でも、噴火の規模や性質は噴火毎に異なるし、更に過去にさかのぼると、噴火の間隔がこの周期から大きくはずれることもある。他の火山に目を転ずると、発生時期に明確な周期性が認められない火山も少なくない。

キラウエア火山やエトナ火山など、噴火を頻繁に繰り返す火山には沢山の噴火記録がある。これらの火山について噴火の時系列を解析してみると、発生時期に周期の様な特徴的な時間スケールは認められず、時系列はむしろフラクタルの性質をもつという (Dubois and Cheminee, JVGR 45, 197-208, 1991)。ただし、同じ火山でも解析する時期によってフラクタル次元にばらつきがあり、フラクタルであるとする解釈は確立されたとは言えない。この種の解析には噴火発生時期のデータが豊富に必要なので、解析が可能な火山は実際にはごく限られる。

このような背景のもとに、噴火の時間間隔や規模を決める物理的な要因を解明する目的で、簡単なマグマ供給系のモデルを用いて解析を始めた。噴火の周期性は、深部から一定の割合でマグマだまりに供給されたマグマが、その容量を超えたときに地表に溢れ出すと考えれば、定性的には理解できる。噴火の周期的な発生を簡単な微分方程式を用いて定量的に定式化するモデルとして、著者はマグマだまりの圧力に従って出口で通路が粘性的に閉鎖するというモデルを以前提案したことがある (Ida, GRL, 23, 1457-1460, 1996)。今回の解析には、それを改良したモデルを用いる。解析の主要な興味は、下部から入ってくる流量の変動や、上部から出ていく流れの状態によって、噴出の周期性や規模がどんな影響を受けるかにある。

今回の解析に用いたモデルは、マグマだまりと接続された上部火道でマグマの多様な上昇様式を設定できるが、発表では上部火道に単に一樣なマグマの流れを仮定する。以前のモデルと同じく、マグマだまりの圧力はマグマの蓄積量に比例して弾性的に増減し、その圧力の変化に応じて上部火道につながる出口が粘性的に閉鎖すると考える。ただし、出口の閉鎖を支配する粘性率は、出口の半径が小さくなると指数関数的に増大すると仮定する。下部から供給される流量が一定で、上部火道も一樣な流れで満たされる場合には、このシステムはマグマがほぼ周期的に蓄積と放出を繰り返す解をもつ。この周期解で下部からの供給量を大きくすると、噴出の時間間隔はその反比例に近い割合で減少し、最大噴出率も多少減少する。このとき噴出量は増加する。

今回の発表では、下から供給される流量に周期的な変動があるときに、地表への噴出がその変動からどんな影響を受けるかを問題にする。数値シミュレーションの結果を見ると、供給流量の周期が噴出の固有周期と同程度かそれより短い場合には、噴出の周期は多少長くなり、最大噴出率も多少増加するものの、時間的には両方ともほとんど一定な状態を保つ。逆に、供給流量の周期が噴出の固有周期よりも十分に長いと、噴出の周期と噴出量は供給流量の変化に合わせて変動する。供給流量の周期がその中間にある場合に限り、噴出に不規則な乱れが生ずる。

キーワード: 噴火, 周期性, マグマ, マグマだまり, マグマ供給システム, 数値シミュレーション

Keywords: volcanic eruption, periodicity, magma, magma chamber, magma plumbing system, computer simulation

脱ガスと結晶化が溶岩ドームから爆発的噴火への遷移過程に与える影響 Effects of gas escape and crystallization on a transition from lava-dome to explosive eruption

小園 誠史^{1*}, 小屋口 剛博²

KOZONO, Tomofumi^{1*}, KOYAGUCHI, Takehiro²

¹ 防災科学技術研究所, ² 東京大学地震研究所

¹NIED, ²ERI, Univ. of Tokyo

溶岩ドーム噴火においては、マグマからのガスの分離（脱ガス）と結晶化の程度が火道流のダイナミクスに大きな影響を与える。一般に火道流のダイナミクスは、定常流におけるマグマ溜まりの圧力（ p_{ch} ）とマグマ噴出率（ q ）の関係（以下、 p_{ch} - q カーブとよぶ）によって特徴づけられる。この p_{ch} - q カーブの傾き（ dp_{ch}/dq ）が正の場合（正の抵抗）、その領域における定常流は安定である。一方、 dp_{ch}/dq が負の場合（負性抵抗）、マグマ噴出率の急激な増加や周期的変動などの複雑なダイナミクスが出現する。本研究では、一次元火道流モデルに基づき、脱ガスと結晶化の組み合わせの効果が、 p_{ch} - q カーブの特徴や負性抵抗によってもたらされる火道流の遷移過程にどのような影響を与えるのかを調べた。

脱ガスと結晶化を考慮した火道流の場合、負性抵抗をもたらす2つの正のフィードバックメカニズムが存在する。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2つのフィードバックメカニズムによって、低噴出率と高噴出率の領域で正の抵抗をもち、その間の中間領域で負性抵抗をもつS字型の p_{ch} - q カーブがある現実的な条件で出現する。低噴出率領域における火道流の安定解は火口におけるマグマ発泡度が低く、一方で高噴出率領域の安定解はその発泡度が高いという特徴があり、これらの解はそれぞれ安定な溶岩ドーム噴火と爆発的噴火に相当する。火道流の時間発展変動に関する解析の結果、このS字型の p_{ch} - q カーブのために、深部でのマグマ供給率が低噴出率領域から中間領域へ徐々に増加していった場合、マグマ噴出率が低噴出率領域から高噴出率領域へ急激に増加する遷移過程が生じた。これは溶岩ドームから爆発的噴火への遷移過程に相当する。

本研究の解析の結果、溶岩ドームから爆発的噴火への遷移過程を支配するメカニズムがマグマの斑晶量に依存して変化することがわかった。高斑晶量（体積分率 >0.5 ）の場合、フィードバック1が負性抵抗形成の主要なメカニズムになる。この場合、溶岩ドームから爆発的噴火への遷移は、深部におけるマグマ供給率が一定の臨界値を超えた場合に起こる。一方で低斑晶量（体積分率 <0.5 ）の場合、フィードバック2が負性抵抗形成に主要な役割を果たす。この場合、遷移過程が火道周辺の母岩における脱ガス浸透率によって支配され、遷移が起こる臨界供給率が浸透率減少とともに急激に減少するという特徴がある。このフィードバック2による遷移過程では、火山ガス組成が大きく変化し、火道内のマグマ発泡度が約0から0.8以上まで急激に増加し、また浅部における過剰圧が生じるという複雑な火道流の変動パターンを伴う。これらは地球化学的・地球物理学的観測によって検知できる可能性がある。

キーワード: 溶岩ドーム噴火, 火道流, 数値モデル, 噴火推移, 脱ガス, 結晶化

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

宇宙線ミュオンによる雲仙溶岩ドームの観測 The radiography of the latest lava dome in Unzen by cosmic muons

宮本 成悟^{4*}, C. Bozza¹, N. D'Ambrosio¹, G. De Lellis¹, 中村 光廣³, 清水 洋², 田中 宏幸⁴
MIYAMOTO, Seigo^{4*}, C. Bozza¹, N. D'Ambrosio¹, G. De Lellis¹, M. Nakamura³, H. Shimizu², H. Tanaka⁴

¹ 伊国立核物理研究所, ² 九州大学大学院理学研究院, ³ 名古屋大学大学院理学研究科, ⁴ 東京大学地震研究所
¹ INFN, Italy, ² Kyushu university, ³ Nagoya university, ⁴ ERI, University of Tokyo

粘性の高いマグマによって作られる溶岩ドームの内部構造を調べることは、溶岩ドームの成長メカニズムの解明にとって重要である。1991年～1995年の噴火により形成された雲仙岳の溶岩ドームの、宇宙線ミュオンを用いた内部構造観測計画が進められている。Nakada et al., (1995) は、の観測とそれに基づく雲仙溶岩ドームの内成的成長モデルの推察から、現在の溶岩ドーム密度構造を推定し、ミュオンラジオグラフィによってどの程度の優位な結果を得られるかシミュレーションを行った。結果、25mの高空間分解能で優位な密度決定を行うことができることがわかった。中田教授らの提案するモデルの検証が可能なデータを得られる見通しを得た。溶岩ドーム形成がこのような peel model を経て成長している場合、現在の溶岩ドームは楕円体の密度が高い部分と、その周りの密度の低い瓦礫の部分が massive な楕円体部分の下に存在することが予想される。

3層からなる原子核乾板検出器を貫通するミュオン飛跡を系統的に解析することで、ミュオン検出感度、偶然一致によるバックグラウンドの見積りなどの基本的性能の評価がなされ、さらに低エネルギー電子飛跡を取り除いたあと、山体の場所ごとの密度長が計算される。検出器のパフォーマンスとラジオグラフィの最初の結果を報告する。

キーワード: 火山, 雲仙, ミュオン, 非破壊, 溶岩ドーム, 噴火

Keywords: volcano, Unzen, muon, nondestructive, lava dome, eruption

桜島における空振ラインアレイ観測

Line-Array infrasound observation for volcanic eruptions at Sakurajima volcano

横尾 亮彦^{1*}, 鈴木 雄治郎², 井口 正人¹

YOKOO, Akihiko^{1*}, SUZUKI, Yujiro², IGUCHI, Masato¹

¹ 京都大学地球熱学研究施設, ² 東京大学地震研究所, ³ 京都大学防災研究所

¹AVL, Kyoto University, ²ERI, University of Tokyo, ³DPRI, Kyoto University

2010年のEyjafjallajökull火山や2011年のGrimsvotn火山、Puyehue火山群の噴火のように、大量の火山灰がひとたび噴煙として放出されると、火山近傍だけに限らず、広範囲にわたる地域において、航空機の飛行制限などに起因した多大な社会的影響が発生する。そのため、火山噴火発生の有無、噴火規模の判定、噴煙の追跡などに対する要請が火山観測研究に求められてきており、空振観測はその一部に対して貢献をしている(例えばFee et al, 2010JVGRなど)。近年では、ブルカノ式~プリニー式噴火に伴う空振記録の周波数特性が、実験的な乱流ジェットの振動周波数と比較的類似した傾向を持つことが示され(Matoza et al., 2009GRL)、噴煙ジェットによる空振についての研究を進めることで、将来的に、空振観測から噴煙ジェットの半径や速度、体積フラックスや流体特性などに迫れる可能性があることが指摘されている。もしこれが実現されれば、噴火活動モニタリング手法のひとつとしての、空振観測の重要性がよりいっそう高まる。しかしながら、現在のところ、噴煙運動そのものや噴煙放出過程と空振放射の具体的メカニズムの関係性について、きちんと理解されているわけではない。噴火に伴う空振活動の特性や正確な波源、またそれらの時間推移などを明らかにすることが先決である。そこで我々は、火山噴煙の噴出、拡大、上昇過程に伴う空気振動現象について、その放射過程の詳細を定量的に解明することを目的とした空振アレイ観測を桜島において実施した。

桜島の噴火活動度は日本屈指であり、2006年に南岳南東斜面に開口した昭和火口では、今も散発的なブルカノ式噴火が繰り返されている。気象庁の火山活動解説資料によれば、2011年にはその数は1000回近くに及んだ。噴火活動の大半は噴煙高度1km程度の極小規模なブルカノ式噴火であり、噴火回数にカウントされないような灰放出はほぼ日常的に発生している。また、表面的には目立った噴火活動が認められない時間においても、現地では大音響の鳴動が聞こえる場合もあり、その表面現象の多様性は空振現象の観測研究に適している。空振アレイ観測は、2011年7月末から12月にかけての半年弱、昭和火口から3.3km東に位置する京大防災研神観測室近傍において、5台の低周波マイクロホン(Datamark SI102)を使用して実施した。2011年12月の数日間は、さらに4台の同型マイクロホンを使用した追加観測も行った。観測点配列は50~100m間隔で火口方向に直線状とし、追加観測時には、全体として十字型アレイになるよう、これに直行する方向に80~100m間隔でマイクロホンを配置した。データ収録には3台の近計EDR-X7000(1kHzサンプリング)を(追加観測ではDatamark LS8800を4台;200Hzサンプリング)使用した。

この観測によって、明瞭な爆発型の空振(~200Pa)や、2Hz弱の周波数だけにピークをもつ0.1Pa程度の微弱な微動型空振など、さまざまなタイプのものが記録された。ここでは、特に多点観測を実施した12月16日、17日の噴火イベントの解析結果を紹介する。火口に一番近い観測点を基準点とし、それ以外の各観測点との間の空振位相の時間差を相関法によって求めた。そして、空振伝播速度を大気音速340m/sとして、求めた観測点ごとの時間差から、到来方位や火口における波源高度に変換した。解析結果は、噴火開始後のおよそ10秒弱は、火口方向から空振が到来していることを明瞭に示す。波源高度は基本的には火口部の標高でほぼ一定であるが、噴煙塊噴出のタイミング(火口部における巨大渦構造の形成)に呼応して、わずかな高度の増減が認められる。その後の数秒間で到来する位相は、観測点の北西側からくるが、時間経過とともに北側へ遠ざかる。桜島山体北東稜線部からの回折波だと考えられる。その後、観測点からの方位角180度~90度に位置する始良カルデラリムの一部からの反射波が支配的になる。往復相時の増大で説明されるように、時間経過とともに反射位置はカルデラ地形の南から東方向へ移動していく。この反射によって、空振振幅はおおむね1/50~1/150ほどに減衰する。噴煙噴出が続いていたとしても、噴火開始から1分以上にわたって、噴火最初期の爆発空振の位相の影響が強く残るため(すなわち、爆発の主位相が回折波、反射波として北西側、南~東側から到来し続けるため)、そのあとに放射され続けていると考えられる空振位相を認識することは難しい。当初の研究目的である、噴煙挙動と空振特性との詳細な対応性は明らかにするためには、このような空振波形記録からでも、本来の火口起源のシグナルを抽出する方法を構築する必要がある。

火道・噴煙統合モデルの構築に向けて(その4)3次元数値計算による噴煙の内部構造の解析

A combined model of conduit flow and eruption cloud dynamics. Part 4. Internal structure of eruption cloud

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, University of Tokyo

我々は、噴煙のダイナミクスとマグマ溜りの条件を統一的に理解することを目標として「火道・噴煙統合モデル」を構築している。このモデルは、ある開き角で上方に広がる火口をもつ火道を想定し、マグマ溜りの深さと圧力を境界条件として与えたときの火道流と噴煙のダイナミクスについて、1次元定常火道流モデル(Koyaguchi, 2005; Koyaguchi et al. 2010)と3次元噴煙モデル(Suzuki et al., 2005)に基づいて数値計算するものである。本研究では、当面の課題として、このモデルを用いて、マグマ溜りや火口の条件が火砕流発生条件に与える影響を明らかにすることを目標とする。

従来、爆発的噴火における火砕流発生(噴煙柱崩壊)条件は、マグマの性質(例えば含水量・温度)が与えられた場合、主に噴出率のみによって決定されると考えられてきた(例えば, Carazzo et al., 2008)。それに対して、Koyaguchi et al. (2010)は、火口の形状が火砕流発生条件に大きな影響を与えると主張した。前回の発表(小屋口・鈴木 2011年合同学会)では、「火道・噴煙統合モデル」に基づいて、Koyaguchi et al. (2010)の主張を確認するとともに、このモデルによる火砕流発生条件が、1次元定常火口減圧モデル(Woods and Bower, 1995; Koyaguchi et al., 2010)と1次元定常噴煙モデル(Bursik and Woods, 1991)の組み合わせから求められる条件と概ね一致することを示した。本発表では、両者が一致する物理的根拠を明らかにするために、火口形状の変化に伴う噴煙の内部構造変化について詳細に検討する。

Koyaguchi et al. (2010)によると、一定噴出率で火口から噴出する流れのタイプは、火口上端の径と噴出圧力というパラメータスペース上で、(1)火口上端において大気圧以上の噴出圧力を持つ音速流、(2)火口底部で音速に達した後、火口上端で大気圧以上の噴出圧力をもつ不足膨張超音速流、(3)火口底部で音速に達した後、火口上端で大気圧以下の噴出圧力をもつ過膨張超音速流、(4)火口上端において大気圧で噴出する亜音速流、の4領域に分かれる。(2)、(3)の境界では、火口上端で大気圧になる適合膨張超音速流としてマグマが噴出する。火口上端の径の増加、噴出圧力の減少とともに、流れのタイプは(1)から(4)に向けて変化する。(1)(2)の流れにおいては火口直上で膨張波を伴う加速によって上昇速度が増加するのに対し、(3)の流れにおいては火口直上で衝撃波を形成し上昇速度が著しく減少する。その結果、同じ噴出率でも、火口上端の径が大きく、あるいは、噴出圧力小さくなると、(3)または(4)の流れになり、より火砕流を発生しやすくなる。

3次元数値シミュレーション結果から、(1)(2)の流れと(3)の流れで、噴煙の内部構造が著しく異なることが明らかになった。(1)(2)の流れにおいては、火口直上に「パレルショック」と呼ばれる構造が形成される。パレルショックの上端ではマッハディスク衝撃波が形成され、軸部の上昇流が急減速する。一方、ジェット周縁部ではマッハ3程度の高速度を保って上昇する。周縁部高速領域では、圧力変動を伴う不安定な流れが発生し、その流れが大気と噴煙の効率的な混合を促進することによって、安定な噴煙柱が形成される。(3)の流れにおいては、火口直上に「斜め衝撃波」と呼ばれる構造が形成される。超音速で噴出したジェットは斜め衝撃波で減速される。火口上端の径が増加するに従って斜め衝撃波の角度が水平に近づき、上昇速度の減少率が大きくなる。その結果、噴煙柱が崩壊し火砕流が発生しやすい状態になる。「斜め衝撃波」の角度によっては、噴煙柱から火砕流への遷移状態において噴煙が部分的に崩壊して小規模な火砕流を発生する現象が観察される。

キーワード: 火山噴煙, 火道流, 数値シミュレーション, 圧縮性流体力学

Keywords: eruption cloud, conduit flow, numerical simulation, compressible fluid dynamics

渦輪モデルによる火山噴煙の噴出速度推定

Estimation of exit velocity of a volcanic eruption column by a vortex ring model

諏訪 博之^{1*}, 鈴木 雄治郎², 横尾 亮彦¹SUWA, Hiroyuki^{1*}, SUZUKI, Yujiro², YOKOO, Akihiko¹¹ 京都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, Kyoto Univ., ² ERI University of Tokyo

火山噴煙の噴出速度は、火道でのマグマの破碎や上昇、火口での爆発現象や噴煙の挙動など、火山現象一般のダイナミクスにおいて基本的かつ重要なパラメータである。しかし実際の噴煙の噴出速度を画像・映像観測によって直接求めることは難しく、これまでの研究では、噴煙の上昇速度や表面速度を求めるものが中心である。一方で、噴出開始時の火山噴煙頭頂部に見られる大きな渦構造(例えば, Patrick, 2007, JGR)は、室内実験における噴流の渦輪とよく似た性質を示すと考えられ、後述する噴流噴出速度と渦輪の関係式が火山噴煙に対しても適用できる可能性がある。そこで本研究では、火山噴煙頭頂部の渦構造の画像・映像解析から噴煙噴出速度を推定することを試みた。

一般に、円形ノズルから排出される噴流は、噴出開始時にノズルのエッジ部分で境界層が分離して巻き上がることで、噴流頭頂部に円環状の構造、すなわち渦輪を形成する。形成された渦輪は後続噴流を取り込むことで成長を続け、下流へと進んでいく。ピストンを用いた渦輪生成実験によって、渦輪の特性を表す主なパラメータ(渦輪半径、並進速度、循環、そして渦輪の断面半径、すなわち渦核半径)は、ノズルの直径とピストンストローク tU (t :時間, U :ピストンによる噴出速度)によって決まることが分かっている。Gao and Yu (2010, JFM)は、噴出速度 U を一定、後続噴流の速度は噴出速度と等しいと仮定して、渦輪の循環 C の時間変化を、噴出速度 U と渦輪の並進速度 u によって、 $dC/dt=1/2U^2-Uu$ (式1)と近似的に求めた。この(式1)から、渦輪の並進速度と循環の時間変化により、噴流の噴出速度を推定することができる。

(式1)で表される噴流噴出速度と渦輪の関係式が、火山噴煙に対して適用可能であるかを検証するため、火山噴煙の3次元数値計算結果に対して解析を行った。Suzuki et al. (2005, JGR)に基づいて、3通りの噴出速度(67m/s, 134m/s, 201m/s)で3次元数値計算を行ったところ、いずれの数値計算結果でも、高度500-1000mまでは安定した渦構造が噴煙頭頂部に確認された。そこで、噴煙噴出開始後の各時刻における渦輪の高度を読み取り、それらから渦輪の上昇速度を求め、これを渦輪並進速度 u とした。また各時刻における渦核半径と渦輪表面速度から渦輪の循環 C を推定し、その時間変化 dC/dt を求めた。一般に u , dC/dt は一定ではないが、噴出開始時から各時刻までのデータを用いて線形近似することで u , dC/dt を求め、(式1)により噴出速度を推定した。その結果、渦輪の高度の増加とともに、推定される噴出速度は減少する傾向があったものの、本来の値の80-125%の範囲で噴出速度を推定することができた。

2011年2月15日の桜島昭和火口の噴煙に対して、同様の方法により噴煙噴出速度を推定した。この噴火における噴煙は、最高高度が火口縁上2-2.5kmであり、2011年の昭和火口での比較的大きな噴煙の一つである。噴煙頭頂部の渦構造は火口縁上1-1.5kmまでは確認されたが、その後、渦構造部分は噴煙本体から分離して上昇を停止し、徐々に崩壊した。渦輪の高度増加による噴出速度の過小評価(0.8倍程度に減少)を補正した結果、2月15日の噴火での噴煙噴出速度は40-60m/sと推定された。(式1)による噴煙噴出速度の過小評価の原因の一つとして、火山噴煙の場合、たとえ噴出速度が一定であっても、エントレインメントや重力などによって噴煙速度が高度とともに減衰し、(式1)の仮定(後続噴煙速度=噴出速度=一定)が成り立たないことが考えられる。そのため、噴煙速度の減衰を適切に補正できるような改良を行うことが、今後の課題として挙げられる。また、2011年の桜島昭和火口の噴煙噴出速度は40-60m/sと推定されたが、この値は、一般に想定されるブルカノ式噴火の噴出速度(数十-400m/s)の中でも小さい噴出速度であると考えられる。低い噴出速度は、マグマ破碎時の初期圧力が低いことに起因すると考えられ、噴火メカニズムを議論する上での一つの重要な要素となると考えられる。

火山噴煙の3次元数値シミュレーション：周囲の風が噴煙高度に与える影響 3-D numerical simulations of eruption clouds: Effects of the environmental wind on column height

鈴木 雄治郎^{1*}, 小屋口 剛博¹
SUZUKI, Yujiro^{1*}, KOYAGUCHI, Takehiro¹

¹ 東京大学 地震研

¹ ERI University of Tokyo

噴煙は単位時間にマグマから大気に供給される熱エネルギーの直接的指標であり、爆発的噴火過程や噴火強度を推定する上で貴重な情報源となる。したがって、噴煙の観測と火口での噴出条件を定量的に正しく関係付けることが、火山学上・防災上に強く要請されている。噴煙高度と噴出条件の関係に関しては、従来より、風のない成層大気中で大気圧と平衡状態にある噴煙が水平方向に均質であると仮定した定常1次元モデルが提案されている [例えば, Woods, 1988]。この定常1次元モデルでは、大気状態とマグマ物性 (温度, 揮発成分量), 噴出条件 (噴出率, 噴出速度) を与えたときに、噴煙柱の高度 ($H_{no-wind,1D}$) が見積もられる。更に, Bursik [2001] は定常1次元モデルを風の影響がある条件まで拡張した。このモデルは、風の存在で噴煙による大気の取込み量が増加し、それによって噴煙の到達高度 ($H_{wind,1D}$) が $H_{no-wind,1D}$ より低下する可能性があることを示した。2011年1月26・27日の霧島山新燃岳噴火では、強い西風によってたなびく噴煙が人工衛星によって観測されている。この時の噴煙高度は、気象レーダー観測から7-8 kmであったと推定されている [新堀他, JPGU2011]。この噴火について、1次元モデルに基づいて観測されている噴出率から噴煙高度を見積もったところ、風がない場合の1次元モデル予測値 ($H_{no-wind,1D}$) は8.9-11.4 km, 風の効果を含めた1次元モデル予測値 ($H_{wind,1D}$) は4.2 km となり、いずれも実測値と有意に異なるものとなった。そこで、風が噴煙高度に与える影響を定量的に明らかにするために、3次元モデルで新燃岳噴火における噴煙高度を正しく再現することを目指した。

噴煙の非定常3次元モデル [Suzuki et al., 2005] の初期条件として水平方向に一樣な風を入れ、標高1400 m から火山灰と火山ガスの混合流体が噴出する様子をシミュレーションした。大気密度・圧力・温度と風速の高さプロファイルは、非静力学モデル (気象研究所 NHM) から求めた新燃岳付近の大気構造 [橋本他, JPGU2011] を与えた。マグマ温度と揮発成分量は岩石学的に求めた1000 K, 3 wt% [鈴木他, JPGU2011] をそれぞれ仮定した。噴出率は傾斜変動データを用いて見積もられた 10^6 kg/s [小園他, JPGU2011] とした。シミュレーションの結果、人工衛星から実際に観測された東?東南東にたなびく噴煙の再現に成功した。また、噴煙は火口から水平方向に12 km 離れた地点で高度7 km まで達し、レーダー観測データと定量的によく一致した。

噴煙高度に与える風の影響を見るために、風速の高さプロファイルを変化させたパラメータスタディを行い、3次元シミュレーション結果と1次元モデル予測 ($H_{wind,1D}$) の比較を行なった。その結果、噴出条件が同じにも関わらずその高度に多様性が見られた。噴煙の最高高度はいずれの場合も $H_{wind,1D}$ より高くなったが、水平方向に流れる噴煙の中心高度は $H_{wind,1D}$ と等しくなる場合とそれより高くなる場合があった。これらの結果より、噴煙高度は風のプロファイルによって変化することが分かる。したがって、噴煙高度に与える風の影響を1次元モデルで定量的に正しく予測するためには、その基礎となるメカニズム (例えば、エントレインメントに対する風の影響) を根本から見直さなければならない。

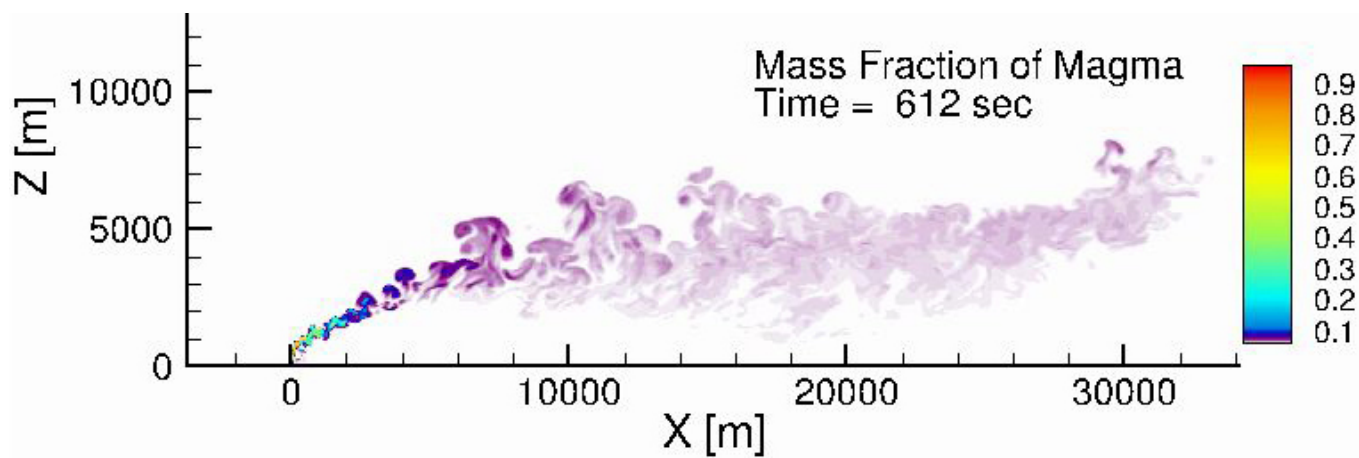
キーワード: 火山, 噴煙, 数値シミュレーション, 乱流混合

Keywords: volcano, eruption cloud, numerical simulation, turbulent mixing

SVC54-P13

会場:コンベンションホール

時間:5月20日 15:30-17:00



1888年磐梯山水蒸気爆発のメカニズム (4) 噴火直後の写真・スケッチの再考 The Mechanism of the 1888 Phreatic Explosion at Bandai Volcano Part 4: A Second Thought of Visual Data

浜口 博之^{1*}, 植木 貞人²

HAMAGUCHI, Hiroyuki^{1*}, UEKI, Sadato²

¹ 無, ² 東北大学理学研究科

¹Free, ²Graduate School of Science, Tohoku Univ.

1888年磐梯山水蒸気爆発は写真, スケッチ, 目撃談などの残された情報をもとに解釈がされてきたが, 噴火過程の解明は未だに混迷した状態にある。鉛直上方に円柱状の水煙が15~20回噴出し、その直後に「最終ノ一発ノミ北二向ヒテ横二抜ケタリ」と表現される横方向の噴出に伴い山体崩壊・岩屑なだれが北麓で起きた。また、これらの噴出とは別に南東方向の枇杷沢を猛烈な疾風(プラスト)と土石流が流下した。これら3方向の噴出の源は小磐梯山直下であり、その通り道が異なるとする Sekiya and Kikuchi(1890)の解釈が今日でも通説として流布している。しかし、小磐梯山直下に水蒸気爆発源があるとする解釈ではプラストによる被害の局地性や方向性等の説明ができないなど相容れない観察事実も散見される。

噴火直後の噴煙柱を撮影した写真は現在3枚残されている。会津若松市(1966)の写真をもとに Yonechi (1988) は2つのプリューム発生位置を同定した。しかし、この写真は画質の劣化からその他の噴煙は確認できない。竹本(2002)は保存状態の良い写真をもとに、Yonechi(1988)の議論したプリュームの他に大磐梯山の背後にもうひとつの巨大なプリュームのある可能性を示唆した。本研究では竹本(2002)と福島民報社(1988)の噴煙写真をもとに解析を行い、第3のプリューム発生場所を沼の平と同定するとともに、水煙の噴出に伴った水蒸気のプリュームは小規模でその温度も低温であったと推論する。これらの結果を熱水溜まりは沼の平旧火口直下に存在するとした浜口・植木(2012)の噴火モデルと関連させて水蒸気爆発過程を論ずる。

キーワード: 磐梯山, 水蒸気爆発

Keywords: Bandai volcano, phreatic explosion

桜島昭和溶岩の高温一軸変形実験

High temperature uniaxial deformation experiment for Sakurajima Showa Lava

石橋 秀巳^{1*}, 三輪 学央², 平賀 岳彦¹

ISHIBASHI, Hidemi^{1*}, MIWA, Takahiro², HIRAGA, Takehiko¹

¹ 東京大学地震研究所, ² 東北大学大学院理学研究科地球物理学専攻

¹ERI, Univ. Tokyo, ²Geophysics, Science, Tohoku Univ.

マグマの流動則は、火山噴火のダイナミクスに強い影響を及ぼすパラメーターのひとつである。それ故に、マグマの流動則に関する知識は、火山噴火のダイナミクスを理解・予測するうえで必要不可欠といえる。とりわけ、マグマ中に浮遊する結晶の影響は極めて重要である。なぜなら、これらの結晶は、マグマの粘性率増加・非ニュートン流体的ふるまいを引きおこし、マグマの挙動を液体的から固体的へと劇的に変化させるためである。この結晶の効果は、火山噴火様式や地表での溶岩流の挙動にも著しい影響を及ぼすことが既に指摘されている。しかしながら、高結晶量 (>40vol.%) のマグマの流動則については、近年の活発な研究にもかかわらず、未だ理解不十分なままである。そこで本研究では、高結晶量マグマの流動則に及ぼす浮遊結晶の影響を検討するため、天然の高結晶量溶岩の高温変形実験を行った。

今回、実験試料として用いたのは、桜島火山 1946 年噴火により流出した昭和溶岩である。桜島火山は有史時代に少なくとも 5 回溶岩を流出しており、昭和溶岩はその中で最も新しいものである。今回、試料として用いた昭和溶岩は、桜島東部黒神付近で採取した。この溶岩試料は安山岩質で、主に斜長石と輝石からなる斑晶を約 30vol.% 程度含むのに加えて、石基中に含まれるマイクロライトを考慮すると、その結晶量は約 60vol.% 程度である。また、この溶岩試料は不定形な空隙を焼く 10vol.% 程度含む。この溶岩を幅・奥行きがそれぞれ約 1.3cm、高さ 2.6cm の直方体に整形し、鉛直方向に圧縮変形させ、みかけの粘性率を測定した。実験は、東京大学地震研究所の高温一軸変形試験機を用い、大気圧下、空气中、約 1024 ~ 886 の温度範囲、歪み速度範囲が $10^{-2.4}$ から $10^{-5.5} \text{ s}^{-1}$ の条件で行った。実験の際、まず試料を測定温度で 3 時間保持して焼きなまし、その後 1~4 時間かけて変形させた。1024 より高温では、粘性率は検出限度以下であった。また、886 より低温では試料が脆性破壊し、粘性率の測定ができなかった。

今回測定した条件下で、桜島昭和溶岩の見かけの粘性率はおよそ $10^{-7.8} \text{ Pa s}$ から $10^{-11.8} \text{ Pa s}$ まで変化した。温度の低下に伴って、見かけの粘性率は系統的に増加した。また、いずれの温度でも、歪み速度の増加に伴って粘性率が減少する Shear thinning 的ふるまいが明瞭に認められた。見かけの粘性率の対数と歪み速度の対数との間には線形な関係が見られ、その傾きは -0.505 ($1\sigma = 0.06$) の値を示した。歪み速度一定条件下での見かけの粘性率の温度依存性を検討したところ、絶対温度の逆数に対してほぼ線形な関係を示し、その見かけの活性化エネルギーとしておよそ 1.7kJ の値を得た。この値は、同じ温度範囲における昭和溶岩中に含まれるメルトの見かけの活性化エネルギーと概ね一致する。このことは、今回みられた見かけの粘性率の温度依存性が、メルトの粘性率の温度依存性を反映したものであることを示唆する。このメルトに対する昭和溶岩のバルク粘性率の比 (相対粘度) は、 $10^{-2.5}$ から $10^{-5.5} \text{ s}^{-1}$ の歪み速度範囲でおよそ $10^{2.7}$ から $10^{4.4}$ までおよそ 1.5 桁変動した。この歪み速度条件ではケイ酸塩メルトはニュートン流体としてふるまうと考えられるので、この相対粘度の歪み速度依存性は、マグマ中の結晶組織の歪み速度依存変化を反映していると考えられる。今後、実験試料の岩石組織定量分析を行い、溶岩の見かけの流動則と微細岩石組織との関係を検討する。

キーワード: マグマ, レオロジー, 桜島火山, 非ニュートン流体, 結晶, 粘性率

Keywords: magma, rheology, Sakurajima volcano, non Newtonian, crystal, viscosity

定常火道流モデルから推測される霧島山新燃岳のマグマ溜まりの状態 States of magma chamber of Shinmoe-dake, Kirishima Volcano as inferred from steady flow conduit model

田中 良^{1*}, 橋本 武志²

TANAKA, Ryo^{1*}, HASHIMOTO, Takeshi²

¹北海道大学大学院理学院自然史科学専攻, ²北海道大学大学院理学研究院

¹Graduate School of Science, Hokkaido University, ²Faculty of Science, Hokkaido University

1. はじめに

爆発的噴火から非爆発的噴火への遷移は、しばしば見られる現象である(例えば、1991-92年ピナツボや1980-86年セントヘレンズ)。この噴火様式の遷移の要因については、系の非線形性に起因する多重定常解の存在など、様々な議論が行われている(例えば Kozono and Koyaguchi, 2009 や Woods and Koyaguchi, 1994)。2011年の霧島山新燃岳噴火でも、1月26日-27日の準プリニー式噴火から、28日以降の溶岩噴火への遷移が起こっている。本研究では、Kozono and Koyaguchi (2010)の一次元定常火道流モデルを2011年の新燃岳噴火に適用し、火道内を上昇するマグマが破碎しなくなる条件を探索するという手法で、溶岩噴出移行時のマグマ溜まりの状態を推定することを試みた。この噴火では、マグマ噴出量や噴出期間が明らかにされているだけでなく、各種地殻変動観測からマグマ溜まりの位置もほぼ特定されており、さらに噴出物の分析に基づいて、モデルに与えるべき重要なパラメーターのいくつかが推定されている。この点で、今期の新燃岳噴火は、火道流モデルを適用して、火道内あるいはマグマ溜まりの状態を定量的に考察できる希少な事例であると考えた。上記モデルでは、円筒火道内を流れるマグマは等温の気液二相を仮定しており、気液の相対速度を認めることで鉛直方向への脱ガスが取り入れられている。またマグマの粘性は揮発性成分量と結晶量に依存するとした。

2. 結果と考察

モデルパラメーターを様々な値に変化させた数値計算により、火道を上昇する途中でマグマが破碎するかどうかは、初期含水率、噴出率、温度、火道径に依存することが確認できた。そこで、溶岩噴出率(40 m³/s)を固定し、マグマの温度範囲を950-1050 (鈴木他, 2011; 宮城他, 2011)と仮定して、火道径(10-50 m)を与え、溶岩ドーム噴火になるための初期含水率の条件を求めた。その結果、初期含水率の上限値は、火道半径10mの場合で1.5-3.8 wt%と推定された(噴出率は観察事実に基づいて40 m³/sを仮定)。火道径を大きくすると、含水率の上限値はさらに小さくなる。一方、準プリニー式噴火前の初期含水率は岩石学的研究から3-4 wt%と推定されている(鈴木他, 2011)。これより、準プリニー式噴火から溶岩ドーム噴火への遷移において、含水率の低下が起こっていたことが示唆される。

多重定常解をもつような系であっても、噴出率と火道長を与えると、それを満たすマグマ溜まりの圧力は一意的に決まることが数値計算により確認できた。火道長として、GPS観測から推測されているマグマ溜まりの深さである6-8 km(防災科研, 2011; 気象庁, 2011; 国土地理院, 2011)を与え、溶岩噴出率と温度は上述の推定値を用いる。初期含水率として、先に求めた非爆発的噴火溶岩ドーム噴火になるための上限値を与えると、この諸条件を満たすマグマ溜まりの圧力として、岩石学的研究から推定されている噴火前のマグマ溜まり圧と大きく食い違わない値が得られた。GPS観測により、準プリニー式噴火で力源が収縮したことが推測されており、これはマグマ溜まりの圧力低下を示唆しているが、この際のマグマ溜まりにおける圧力低下量は比較的小さかったことが推察できる。

マグマ溜まりの体積を観測によって推定するのは難しく、各種地殻変動観測でもその変化量しか推定することができない。しかし、本研究では2つの方法を用いてマグマ溜まりの体積を推定することを試みた。一つは、ある期間のH₂O放出量、マグマ溜まりの体積減少量、含水率の低下量を与えて、それを満たすマグマ溜まりの体積を推定する方法である。もう一つは、ある期間の圧力低下量とマグマ溜まりの体積減少量の関係から、マグマ溜まりの体積を推定する方法である。

後者の方法で推定したマグマ溜まりの体積は、前者と比較してかなり大きいという結果が得られた。これを矛盾なく説明するものとして、例えば、収縮に伴った圧力の低下に關与するやや大きなマグマ溜まりの一部に、準プリニー式噴火で効率的な脱ガスに供された領域があり、その領域のマグマが噴出して溶岩ドームを形成した、という概念モデルが考えられる。

有珠山の宇宙線ミュオンラジオグラフィーを行うための低ノイズカロリメータ型宇宙線ミュオン検出器の開発

Development of low noise calorimeter type cosmic ray muon detector to image internal structure of Usu volcano

草茅 太郎^{1*}, 田中 宏幸¹, 武多 昭道¹, 大島 弘光², 前川 徳光²

KUSAGAYA, Taro^{1*}, TANAKA, Hiroyuki¹, TAKETA, Akimichi¹, OSHIMA, hiromitsu², Tokumitsu Maekawa²

¹ 東大地震研, ² 北大有珠火山観測所

¹ERI, University of Tokyo, ²Usu Volcano Observatory, Hokkaido University

We are now developing a low noise calorimeter type cosmic ray muon detector to image internal structure of Usu volcano with cosmic ray muon radiography. Usu volcano has often erupted and formed upheavals such as Oo-usu, Ko-usu, Ogari-yama, and Usu-shinzan. But the conduits of these are unspecified. Thus, we intend to find out the internal structure of Usu volcano with cosmic ray muon radiography.

Cosmic ray muon radiography of volcano has been performed several times: Mt. Asama (Tanaka et al., 2007, NI&M A; Tanaka et al., 2007, EPSL; Tanaka et al., 2009, GRL; Tanaka et al., 2010, JGR), Showa-Shinzan (Tanaka et al., 2007, GRL), and Satsuma-Iwojima (Tanaka et al., 2009, GRL). These cosmic ray muon radiographies had been performed between only a few hundred meters to one kilometer of muon penetrating length of volcanoes. Because the cosmic ray muon flux penetrating through a few kilometers of rock is two or more order of magnitude less than that through a few meters of rock, signal-to-noise ratio becomes worse and therefore we cannot properly determine the density structure.

In order to investigate Usu volcano conduits, we need a better signal-to-noise ratio detector for accurate measurement of cosmic ray muon flux penetrating through a few kilometers of rock. So we are now developing a calorimeter type muon detector that is thought effective for reducing noise. The calorimeter type muon detector consists of several position-sensitive detectors. A position-sensitive detector consists of sets of plastic scintillator strips and photomultipliers, and they make matrix-like segments so that we can detect where muon passes through. Utilizing the muon characteristic of straight passing through detector, we count as muon when we can connect pass points of each position-sensitive detector by a straight line.

We focus on 'fake track' as a noise source: electromagnetic particles such as gamma rays and electrons generated above the muon detector can simultaneously pass through each position-sensitive detector and make a track as if muon comes from a target. This noise would be reduced with use of more position-sensitive detectors.

We will report simulation result how fake tracks are reduced as number of position-sensitive detector changes by combining cosmic ray simulation and reconstruction of muon detector on computer.